สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัย

งบรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี ๒๕๔๘

ขวดพอลิเอทิลีนชนิดปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

Polyethylene Bottle Modified with Calcium Carbonate for Industrial Applications

RCH
TS
198.3
.P5
ส8385
เลขหมู่.....
64317
เลขทะเบียน.....
11 ก.ย. 2549
วัน,เดือน,ปี.....

ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b.....11616871.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่ง $CaCO_3$ ที่นำมาใช้มีทั้งเกรดที่ไม่มีและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) หรือใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการผสม $CaCO_3$ ในปริมาณต่าง ๆ คือ 0 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$ ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ พบว่าการผสม $CaCO_3$ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ขณะที่การบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลง จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของ พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เวลาในการหล่อเย็นของขวดผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อมีการผสม $CaCO_3$ น้ำหนักขวด HDPE/$CaCO_3$ สูงกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์ แต่ความหนาขวด HDPE/$CaCO_3$ น้อยกว่าเมื่อเทียบกับขวด HDPE บริสุทธิ์ ส่วนสมบัติเชิงกลของขวดผลิตภัณฑ์พบว่าค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัสและความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ด้วย SA ส่งผลให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวดผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของขวด HDPE/$CaCO_3$ และจากสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของขวดผลิตภัณฑ์ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การกระจายตัวของ $CaCO_3$ ใน HDPE ยากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มความดันในขั้นตอนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

This research aims to study extrusion blow molding process of $CaCO_3$ – filled HDPE bottles. Both uncoated and stearic acid (SA) coated grades of $CaCO_3$ were used. Maleic anhydride grafted high density polyethylene (HDPE-g-MA) was used as a compatibilizer. $CaCO_3$ contents were varied at 0, 20 and 30% by weight and HDPE-g-MA was used at 1% by weight of $CaCO_3$. All compounds were mixed using a twin-screw extruder. It was found that an addition of $CaCO_3$ increased viscosity but decreased die swell of the samples. An extrusion blow molding machine was used to produce bottles. It was found that all samples had similar volumetric output rate. Cooling time of the blown products decreased with incoporation of $CaCO_3$. The weight of HDPE/ $CaCO_3$ bottle was higher than that of HDPE bottle, but bottle thickness of HDPE/ $CaCO_3$ bottle was less than that of HDPE bottle. From mechanical properties of the blown products, the results indicated that the tensile yield stress, %elongation at yield and falling weight impact strength of HDPE/ $CaCO_3$ bottle decreased with an increase of $CaCO_3$ contents but modulus and hardness were increased. Improvement of tensile yield stress, %elongation at yield and falling weight impact strength of the bottles were achieved by using SA coated $CaCO_3$. An incorporation of HDPE-g-MA had no effect on mechanical properties of the HDPE/$CaCO_3$ bottle. Thermal properties of samples showed that the HDPE crystalline melting temperature, recrystallization temperature and %crystallinity of all samples were similar. Morphology of the samples revealed that the difficulty of $CaCO_3$ dispersion in the HDPE matrix increased with increasing $CaCO_3$ contents. Moreover, properties of the samples were hardly changed with increasing pressures (4-5 bars) in the extrusion blow molding process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ขวดพอลิเอทิลีนชนิดปรับปรุงด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม ดำเนินงานไปได้เป็นอย่างดีโดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2548

ขอขอบพระคุณ บริษัทสุรินทร์ออมย่าเคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต

ผู้วิจัยขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี ในการให้ความสะดวกในการทำวิจัย และขอขอบคุณนายณัฐวุฒิ พยัฆศิริ นักศึกษาปริญญาโทที่ช่วยเตรียมอุปกรณ์สารเคมี และช่วยให้งานลุล่วงด้วยดี

ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		I
ABSTRACT		II
กิตติกรรมประกาศ		III
สารบัญ		IV
สารบัญรูป		VI
สารบัญตาราง		VII
บทที่ 1 บทนำ		1
1.1	ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		3
2.1	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	3
2.1.1	สมบัติทั่วไป	3
2.1.2	การประยุกต์ใช้งาน	4
2.2	แคลเซียมคาร์บอเนต	5
2.2.1	สมบัติทั่วไป	5
2.2.2	การประยุกต์ใช้งาน	6
2.3	กรดสเตียริก	6
2.3.1	สมบัติทั่วไป	6
2.3.2	การประยุกต์ใช้งาน	7
2.4	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์	7
2.5	กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด	8
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย		13
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	13
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.3	วิธีการทดลอง	14
3.3.1	การเตรียมสารตัวอย่าง	14
3.3.2	การทดสอบสารตัวอย่างผสม	15
3.3.2.1	การทดสอบสมบัติการไหล	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.3.2.2 ศึกษาการบวมตัวจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล 15

3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป 16

3.3.3.1 ศึกษาสภาวะการผลิต 16

3.3.3.2 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร 16

3.3.3.3 ศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด 16

3.3.4 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ 17

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ 17

3.3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล 17

3.3.4.3 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในสารตัวอย่าง 18

3.3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน 18

3.3.4.5 ศึกษาการกระจายตัวของ $CaCO_3$ 18

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 19

4.1 สมบัติการไหล 19

4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล 21

4.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป 22

4.3.1 สภาวะที่ใช้ในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์ 22

4.3.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างในกระบวนการเป่าขึ้นรูป 24

4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด 26

4.3.4 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ 27

4.3.4.1 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์ 27

4.3.4.2 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์ 28

4.3.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ 29

4.3.5.1 ความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากและมอดุลัส 29

4.3.5.2 ความแข็งกด 32

4.3.5.3 ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก 32

4.3.6 ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง 33

4.3.7 สมบัติทางความร้อน 34

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 36

5.1 สรุปผลการวิจัย 36

5.2 ข้อเสนอแนะ 37

เอกสารอ้างอิง 38

ภาคผนวก 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
2.1	สมการทางเคมีแสดงการเกิดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	3
2.2	ลักษณะทางกายภาพของ $CaCO_3$ เกรดการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T)	5
2.3	โครงสร้างทางเคมีของ HDPE-g-MA	7
2.4	กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด	8
2.5	สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน	9
2.6	สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA	10
2.7	การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระว่าง HDPE/ HDPE-g-MA/ PA6 ในอัตราส่วนต่างๆ กัน	11
3.1	เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่	15
3.2	เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด	16
3.3	ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป	17
3.4	ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด	17
3.5	ชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ x วัดในแนวตั้งและ y วัดในแนวเส้นรอบวง	17
3.6	ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ	18
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์สูตร HDPE, CA20(2) และ CA30(2)	19
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตร CA20(2), CA20(2g), CA20(2t), CA30(2), CA30(2g) และ CA30(2t)	20
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง	21
4.4	เวลาในการหล่อเย็น (%) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรที่ P = 4 และ P = 5	23
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์	24
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวของพาริซันกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์	26
4.7	ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5	30
4.8	ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5	30
4.9	ค่ามอดุลัสของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5	31
4.10	ค่าความแข็งกดของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5	32
4.11	ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักที่ P = 4 และ P = 5	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
2.1	ผลของค่าดรรชนีการไหลที่มีต่อสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	12
3.1	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	13
3.2	สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน	13
3.3	สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)	14
4.1	รอบการผลิตโดยรวมของ HDPE และพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร	22
4.2	อัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่แต่ละรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร	25
4.3	น้ำหนักต่อขวด	27
4.4	ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์	28
4.5	ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง	34
4.6	สมบัติทางความร้อน	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้พลาสติกเป็นที่รู้จักกันดีเพราะได้รับความนิยมและมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกกันอย่างแพร่หลายโดยทั่วไป เพียงมองดูรอบตัวเราก็จะพบว่ามีผลิตภัณฑ์พลาสติกอยู่ทุกหนทุกแห่งไม่ว่าจะอยู่ภายในบ้านหรือภายนอกบ้าน พลาสติกมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมในหลาย ๆ ด้าน เนื่องจากมีสมบัติพิเศษที่โดดเด่นกว่าวัสดุอื่น ๆ และยังสามารถใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติที่นับวันจะลดน้อยลงไปทุกที

พลาสติกราคาแพงเมื่อเทียบเป็นน้ำหนักวัตถุดิบกับวัสดุธรรมชาติอื่น ๆ แต่พลาสติกกลับมีการนำมาใช้มากเป็นเพราะมีน้ำหนักเบา ทนทาน สามารถผลิต ดัดแปลงและแปรรูปได้ง่าย นอกจากนั้นพลาสติกมีสมบัติทางโครงสร้างพิเศษคือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นในหนึ่งโมเลกุลจึงมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่นมาก ทำให้มีสมบัติหลายอย่างพร้อมกันไปคือสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) เป็นฉนวนไฟฟ้า สมบัติทางเคมี (Chemical properties) ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่น ๆ ด้วย สมบัติดังกล่าวทำให้สินค้าที่ผลิตจากพลาสติกถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย

พลาสติกก่อนที่จะนำไปใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์และเหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละประเภท กระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตขวดและภาชนะอื่น ๆ ที่มีรูปร่างกลวง เนื่องจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีข้อดีคือ สามารถผลิตขวดให้มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้ การออกแบบเหมาะสำหรับภาชนะที่มีผนังบางและมีลักษณะเป็นเส้นโค้งวกเข้าด้านใน อัตราการผลิตสูง ค่าใช้จ่ายในการอัดแบบต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา และวัสดุที่ใช้ก็เป็นที่แพร่หลาย พลาสติกชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดพลาสติกคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [1] เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงทำให้ขวดที่ได้มีความเหนียวและทนทานต่อการซึมผ่านได้ดี นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการทรงรูปที่ดี สามารถผลิตให้เป็นรูปร่างตามต้องการได้ง่าย ใช้เวลาในการผลิตสั้น และที่สำคัญที่สุดคือน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขวดแก้ว

พลาสติกมีอยู่หลายชนิดจึงมีการนำไปใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติและงานที่เราต้องการ แต่มีอยู่หลายกรณีที่พลาสติกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการได้ จึงมีการนำพลาสติกมาผสมกับวัสดุอื่นเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ได้ตามความต้องการของงานที่จะใช้ วัสดุที่นำมาผสมรวมกับพลาสติกคือสารเติมแต่ง (Additives) ในบางครั้งสารเติมแต่งอาจนำมาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติกลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบลดลง สารเติมแต่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่เข้าไปแทนที่พลาสติกเพื่อลดต้นทุนการผลิตและประหยัดปริมาณการใช้พลาสติกเรียกว่าสารตัวเติม (Filler) แต่การใช้สารตัวเติมก็มีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้เนื่องจากมีผลต่อการกระจายตัวในพลาสติก ถ้ามีการใส่ในปริมาณที่มากเกินไปการกระจายตัวก็จะไม่ดี จึงต้องใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ นอกจากนั้นอาจมีการใช้สารเติมแต่งประเภทอื่น ๆ เพิ่มเช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer) สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อช่วยให้การผสมและการกระจายตัวดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติของขวดที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ที่มีการใช้สารเติมแต่งซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA) ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้มีทั้งเกรดที่ไม่มีการเคลือบผิวและมีการเคลือบผิว โดยสารที่นำมาเคลือบผิวคือ กรดสเตียริก (Stearic acid, SA)

1.2 วัตถุประสงค์

ผลิตขวดพลาสติกที่มีสมบัติที่ดีและมีราคาต้นทุนการผลิตต่ำ โดยการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยการนำสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ชนิดที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$ และสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$ มาใช้เป็นสารเติมแต่งใน HDPE โดยในขั้นตอนการผสมจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ $CaCO_3$ ในปริมาณ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาศึกษาสมบัติการไหล แล้วนำไปผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูป และสมบัติของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปและสูตรที่เหมาะสมในการทำบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดจาก HDPE ที่มี $CaCO_3$ ผสมอยู่
2. เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลาสติกเนื่องจากพลาสติกสังเคราะห์มาจากพวกปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีจำกัด และลดต้นทุนการผลิตขวดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก และมีการนำมาใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายแตกต่างกันไปในชีวิตประจำวันของเรา เช่น ขวดภาชนะ เครื่องใช้ในครัวเรือน ถุง ของเล่น และบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นอีกมากมาย พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เกิดจากการนำเอทิลีนมอนอเมอร์มาผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารตั้งต้นคือเอทิลีนได้จากอีเทนซึ่งสารพวกนี้ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี [1]

$$n\,(CH_2 = CH_2) \xrightarrow{\text{polymerization}} -(CH_2 - CH_2)_n-$$

รูปที่ 2.1 สมการทางเคมีแสดงการเกิดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.1.1 สมบัติทั่วไป

HDPE เป็นของแข็งแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline) ซึ่งมีสมบัติความยืดหยุ่นอันเป็นผลมาจากปริมาณของส่วนที่เป็นผลึก (Crystal phase) และปริมาณของส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) ส่วนที่เป็นผลึกนั้นจะให้สมบัติของความแข็งและจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ส่วนอสัณฐานจะให้ความหยุ่นตัวและการทนต่อแรงกระแทก (Impact resistance)

HDPE มีน้ำหนักเบามาก ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.96-0.97 และมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงเกือบตลอดมีโซ่กิ่งน้อยมาก สายโซ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นั้นมีความเป็นผลึกสูง (ร้อยละ 60-70%) จุดหลอมเหลวสูงถึง 135°C ปกติพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70°C ขึ้นไปจะเริ่มพองและละลายได้ในตัวทำละลายพวกโทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไตรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น ทนต่อกรดและด่างได้ดี จึงมักใช้ทำภาชนะบรรจุกรด ด่าง

ประมาณ 20% ของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนที่ใช้จะเป็น HDPE และโดยส่วนใหญ่จะเป่าขึ้นรูปเป็นขวด เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงทำให้ HDPE มีความเหนียวและทนต่อการซึมผ่านของก๊าซได้ดี

พอลิเอทิลีนที่ใช้ในงานเป่าแบบมี 4 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE) แต่ที่นิยมใช้ในงานเป่าแบบมากที่สุด คือ HDPE เนื่องจากว่ามีความสามารถในการทรงรูปที่ดี

ในกระบวนการเป่าแบบการเลือกใช้พลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจะต้องพิจารณาถึงสมบัติพื้นฐานของพลาสติก สมบัติพื้นฐานของ HDPE มีดังนี้

1) <u>ความหนาแน่น</u> (Density)

ความหนาแน่นจะแสดงถึงความสามารถในการตกผลึก พลาสติกที่มีความหนาแน่นสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทรงรูปดีและมีความแข็งแรง แต่จะมีผลทำให้ความต้านทานแรงกระแทกและความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมลดลง

2) <u>ดรรชนีการไหล</u> (Melt flow index, MFI)

ดรรชนีการไหลแสดงถึงความสามารถในการไหลตัวของพลาสติกเมื่อหลอมเหลว พลาสติกที่มีค่าดรรชนีการไหลตัวต่ำจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านแรงกระแทก และความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมสูงกว่าพลาสติกที่มีค่าดรรชนีการไหลสูง นอกจากนี้ยังให้ความเนียนของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า พลาสติกที่มีค่าดรรชนีการไหลต่ำเมื่อหลอมเหลวจะถูกขับออกจากเครื่องจักรได้ยาก และความสามารถในการทรงรูปเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกที่มีค่าดรรชนีการไหลสูง

3) <u>การกระจายน้ำหนักโมเลกุล</u> (Molecular weight distribution, MWD)

สมบัติพื้นฐานที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้ HDPE ในการเป่าแบบคือ การกระจายน้ำหนักโมเลกุล การเลือกใช้พลาสติกที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้างจะช่วยลดปัญหาการแปรรูปได้ การเลือกใช้พลาสติกที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้าง นอกจะช่วยให้ขับพลาสติกเหลวออกจากเครื่องจักรง่ายขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม และช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีผิวเรียบเนียนขึ้น แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์และความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย

2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน

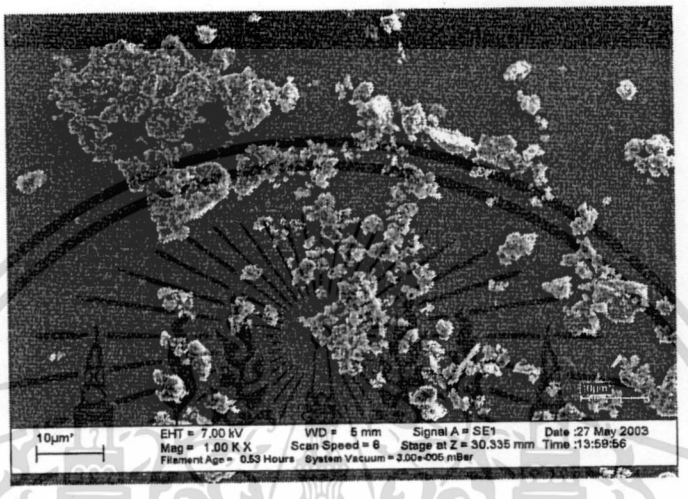
พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้งานสูงที่สุด โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนิยมใช้กับงานเป่าขึ้นรูป ประมาณ 40% ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ทำบรรจุภัณฑ์ประเภทขวด[2] นอกจากนั้นก็จะเป็นภาชนะสำหรับบรรจุภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องใช้กับงานที่มีความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูงและมีน้ำหนักไม่สูงมากนัก

ปกติพอลิเอทิลีนที่ใช้งานมักจะมีการผสมสารต่าง ๆ ด้วย เช่น สารตัวเติม (Filler) สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) สี (Color) เพื่อให้สวยงามน่าใช้ เป็นต้น ซึ่งการผสมสารเติมแต่งเหล่านี้จะช่วยทำให้คุณภาพในการใช้งานเหมาะสมดียิ่งขึ้น [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) มีสูตรโมเลกุลคือ $CaCO_3$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 100.09 ประกอบด้วย CaO 56.03% และ CO_2 43.97% คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกเผาไหม้หมดไปที่อุณหภูมิ 900 ^{0}C



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของ $CaCO_3$ เกรดการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T)

$CaCO_3$ เป็นแร่ธาตุที่มีอยู่อย่างสมบูรณ์บนเปลือกโลก แต่ในอุตสาหกรรมมีการนำ $CaCO_3$ มาใช้เพียง 20% จากทั้งหมด $CaCO_3$ เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติกซึ่งมีหลายชื่อ โดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) หินอ่อน (Marble) และ หินปะการัง (Coral) เป็นต้น แบ่งตามโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซต์ (Calcite) และ อโกรไนต์ (Argonite) เป็นต้น และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างจะเรียกว่า โดโลไมต์ (Dolomite) [3]

2.2.1 สมบัติทั่วไป

- สมบัติทางกายภาพ

สี	ขาว ใส เทา น้ำตาล ดำ
ความแข็ง	3 โมห์สเกล
ความถ่วงจำเพาะ	2.72
จุดหลอมละลาย	2570 ^{0}C
รูปผลึกที่พบบ่อย	สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $CaCO_3$ มีฤทธิ์เป็นด่าง ค่า pH ของ $CaCO_3$ อยู่ในช่วง 9-10 ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ มีค่า pH อยู่ในช่วง 9.5-10.5 นอกจากนั้น $CaCO_3$ ที่มีความละเอียดมาก ๆ จะมีค่า pH ที่สูงขึ้นคืออยู่ในช่วง 10.8-11.3

- การละลายสามารถละลายได้เฉพาะที่ pH เป็นกลาง ไม่ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ ถ้ามีเกลือแอมโมเนียหรือคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ก็จะเพิ่มความสามารถในการละลาย แต่ถ้ามี Alkali hydroxide อยู่จะลดความสามารถในการละลาย

- ขนาดของอนุภาคมีหลายขนาด ตั้งแต่ผงละเอียดจนถึงผงหยาบ

- มีความบริสุทธิ์ ปราศจากสิ่งเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก

- มีการกระจายตัวดีขึ้น ถ้าเลือกใช้เกรดที่มีการเคลือบผิว

- เพิ่มความเหนียว มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก

- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ทนอุณหภูมิได้สูง 750-900 ^{0}C

2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน

$CaCO_3$ มีการใช้กับพลาสติกหลายชนิดตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น[3] $CaCO_3$ นำมาใช้กับพลาสติกเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก นอกจากนั้น $CaCO_3$ ก็ช่วยปรับปรุงผิวของพลาสติก[4] โดยทำให้พลาสติกมีความเงาหรือความมันเพิ่มขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าดีขึ้น ทานทานต่อแรงบีบอัด ควบคุมการหดตัวของพลาสติก ทำให้ผลิตภัณฑ์จากพลาติกทนทานต่อสภาพภูมิอากาศมากขึ้น นอกจากนี้ $CaCO_3$ ยังใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมกระดาษและหินอ่อน และใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

2.3 กรดสเตียริก

กรดสเตียริก (Stearic acid, SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชันของกรด กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอไรด์ซึ่งพบในไขมันสัตว์และพืชหลายชนิด นิยมใช้เป็นสารหล่อลื่นในพอลิเมอร์คอมพอสิตหรือเป็นส่วนประกอบหนึ่งในกระบวนการวัลคาไนเซชันยาง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) ในรูปของ Sterate (Metal sterate) [6]

2.3.1 สมบัติทั่วไป

กรดสเตียริกมีสูตรทางเคมีคือ $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ [7] มีน้ำหนักโมเลกุล 284.48 จุดเดือด 361^{o}C จุดหลอมเหลว 70^{o}C ความถ่วงจำเพาะ 0.847 ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23 ^{o}C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การประยุกต์ใช้งาน

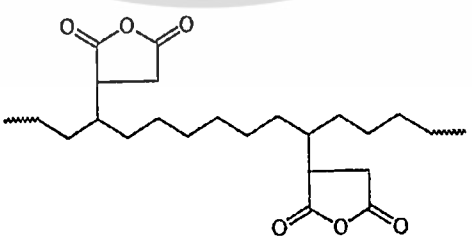
ในการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อให้สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น กรดสเตียริกเป็นสารตัวหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะกับสารตัวเติม $CaCO_3$ เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งในส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนจะเป็นส่วนที่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ หรือเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันก็จะกระจายอยู่ในวัฏภาคของสารตัวเติมและเข้ากันได้กับสารตัวเติม[7]

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมตริกซ์ใกล้กันมากขึ้น
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก รอยบุ๋ม และอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัตถุดิบมีความแข็งแรง
4. ช่วยในเรื่องการกำจัดรอยตำหนิ รอยขัดถูบนพื้นผิว

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์

ในการผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมในบางครั้งจะเห็นว่าพอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปผสมเข้ากันได้ยากมีการแบ่งวัฏภาคกัน การยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของวัสดุทั้งสองไม่ดี เนื่องจากสมบัติความแตกต่างกันของขั้วระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ จึงมีการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) มาใช้ในการผสมพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ ซึ่ง HDPE-g-MA ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ทำให้พอลิเมอร์กับสารตัวเติมผสมเข้ากันได้มากขึ้น โดย HDPE-g-MA จะลดความแตกต่างระหว่างขั้ว ทำให้พอลิเอทิลีนผสมเข้ากับสารตัวเติมที่มีขั้วได้ดีขึ้น [8]



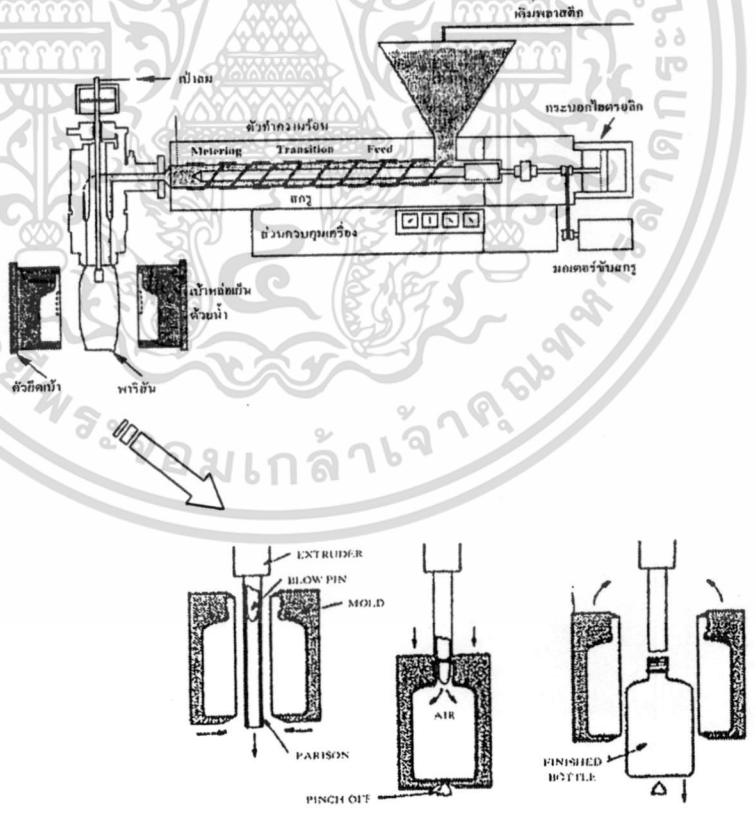
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ HDPE-g-MA[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของ HDPE-g-MA ทำให้ HDPE มีสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น ทำให้ HDPE มีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น (Hydrophilicity) ทำให้ความสามารถในการเปียกดีขึ้น (Wet ability) และทนต่อความร้อนได้ดี (Heat resistance) HDPE-g-MA จึงถูกนำไปใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม ส่วนของพอลิเอทิลีนก็จะเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ และในส่วนของมาเลอิกแอนไฮดรายด์ซึ่งมีความเป็นขั้วก็จะเข้ากับสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้ว ทำให้มีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น [9]

2.5 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding process) เป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงขวด มีหลักการทำงานอย่างง่าย ๆ คือ การอัดรีดท่อพลาสติกกลวงที่เรียกว่า พาริซัน (Parison) ลงภายในแม่พิมพ์ที่มีระบบการหล่อเย็นด้วยระบบน้ำไหลวน ซึ่งนิยมใช้น้ำเย็นที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 20 ^{0}C จากนั้นใช้ลมเป่าโดยความดันลมที่ใช้ขึ้นกับขนาดของเครื่อง ทำให้ท่อพลาสติกพองตัวออกกระทบกับผนังแม่พิมพ์ที่เย็น ทำให้พลาสติกเกิดการแข็งตัวได้ชิ้นงานตามลักษณะของแม่พิมพ์ รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการอัดรีดแบบเป่าขึ้นรูป[10]



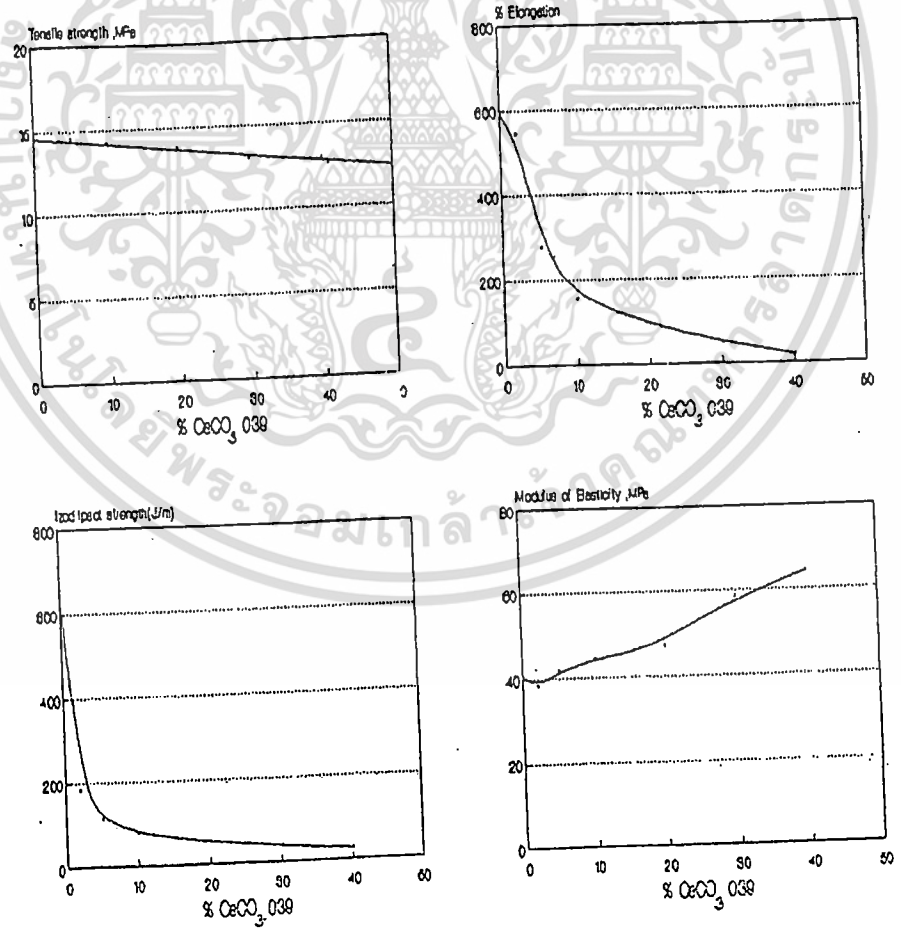
รูปที่ 2.4 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตแบบเป่าขึ้นรูป คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จะมีความสัมพันธ์หรือขึ้นอยู่กับคุณภาพของพาริสันที่อัดรีดออกมาก่อนทำการเป่าขึ้นรูป โดยทั่วไปเมื่อพาริซันออกมาจากปากดายจะเกิดพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลสองประการที่สำคัญคือ การบวมตัว (Extrudate swell หรือ Die swell) และการย้อยตัว (Draw down) โดยพฤติกรรมทั้งสองนี้ให้ผลตรงกันข้ามกล่าวคือ Die swell ทำให้พาริสันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของดาย ส่วน Draw down มีผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพาริสันลดลง เพราะฉะนั้นเพื่อที่จะควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในขั้นตอนการผลิตจึงต้องทราบถึงผลกระทบและพฤติกรรมทั้งสอง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

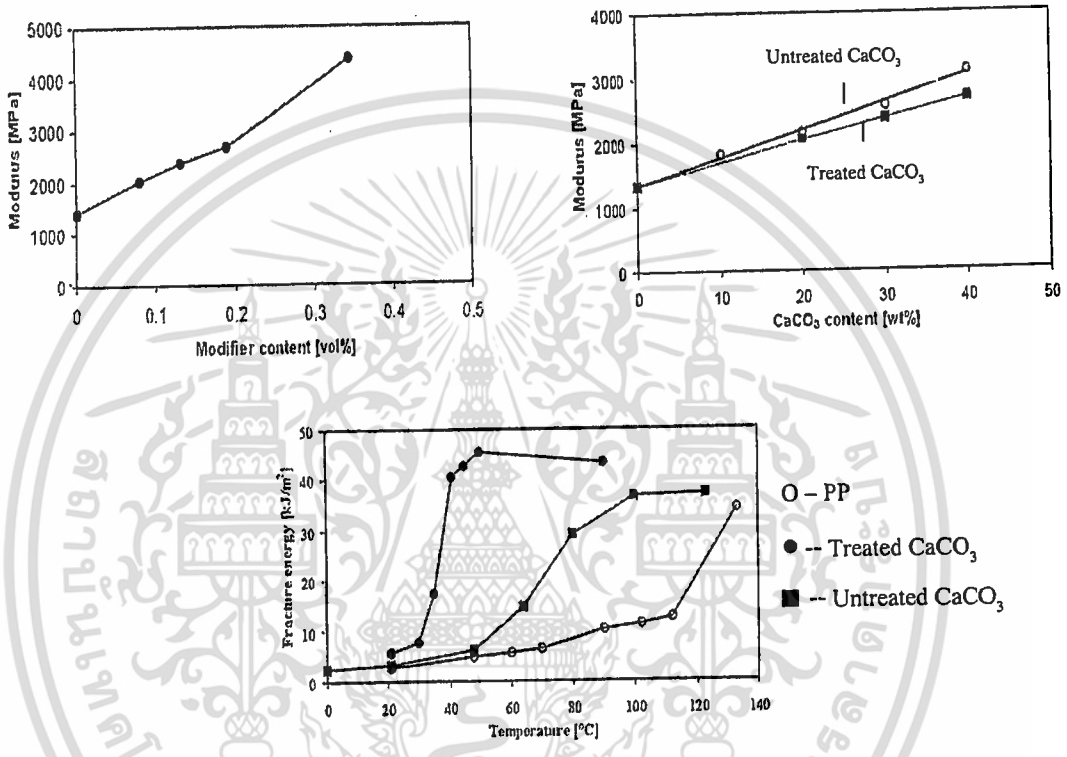
Sumanutvarapun และคณะ[11] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติม ในปริมาณ 0-40% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงกับการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ในขณะที่มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

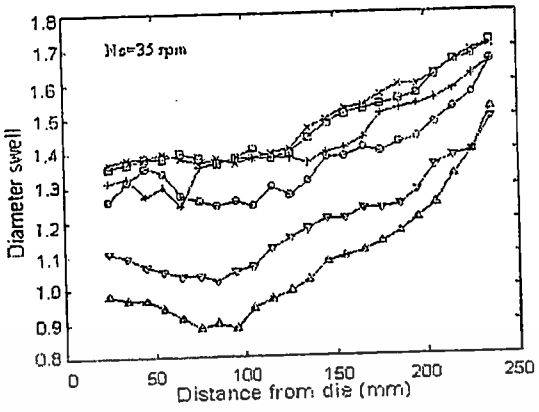
Zuiderduim และคณะ[12] ทำการศึกษาความทนทานของ PP เมื่อมีการใช้ $CaCO_3$ ซึ่งใช้ทั้งเกรดเคลือบและไม่เคลือบ SA พบว่าปริมาณ $CaCO_3$ ที่เพิ่มขึ้นทำให้มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น การใช้ $CaCO_3$ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA พบว่าค่ามอดุลัสที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากเมื่อไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว แต่ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SA ช่วยในการกระจายตัวของ $CaCO_3$ จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง PP กับ $CaCO_3$ มากขึ้น



รูปที่ 2.6 สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA[12]

Huang และคณะ[13] ทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับพอลิเอไมด์-6 (PA6) โดยมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อปริมาณ PA6 เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการบวมตัวของชิ้นงาน (Die swell) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ PA6 ที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE ทำให้การคืนตัวเกิดได้น้อยลง การบวมตัวจึงมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระว่าง HDPE/ HDPE-g-MA/ PA6 ในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดย x = PA6(5%), □ = 15%, + = 25%, O = 35%, ∇ = 45%, Δ = 55% [13]

Wang และคณะ[14] ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสม (LDPE-g-MA) ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับ $CaCO_3$ โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 0-100% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับไม่ใช้สารช่วยผสม เนื่องจากการใช้ LDPE-g-MA เป็นการเพิ่มวัฏภาคของพอลิเมอร์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ LDPE-g-MA ต่ำกว่า 16.7% และตั้งแต่ 16.7% ขึ้นไปค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้ LDPE-g-MA ในปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมแต่เมื่อปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของ LDPE-g-MA ที่มีมากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน

ปรมินทร์และประกฤษฎิ์ [15] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE โดยใช้ $CaCO_3$ ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม (0.1-15.0% โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$) พบว่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ HDPE มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ $CaCO_3$ 30% เพราะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง $CaCO_3$ และ HDPE ส่วนความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคของ $CaCO_3$ มีความแข็งมากกว่า HDPE การใช้ HDPE-g-MA ทำให้ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ HDPE-g-MA มีทั้งส่วนที่มีและไม่มีขั้วในโครงสร้าง ทำให้ HDPE เข้ากับ $CaCO_3$ ได้ดีขึ้น ส่วนความแข็งแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณ 0.1-0.5% ปริมาณที่มากขึ้นของ HDPE-g-MA อาจทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA และส่งผลลบต่อความแข็งแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

ธนเรศและธราศัย[16] ศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ที่มีต่อสมบัติของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ปริมาณของสารช่วยผสม 0.1-2.0% โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$ จากการทดลองพบว่าการเติม $CaCO_3$ ลงใน HDPE ทำให้ความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของ HDPE กับ $CaCO_3$ การใช้สารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ในปริมาณ 0-2% ไม่มีผลต่อความหนืด ส่วนความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อมี $CaCO_3$ ผสมอยู่ เพราะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่าง $CaCO_3$ กับ HDPE ส่วนมอดุลัสและความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจาก $CaCO_3$ มีค่ามอดุลัสและความแข็งที่สูงกว่า HDPE การใช้สารช่วยผสม 0.1% ทำให้สมบัติส่วนใหญ่ดีขึ้น เนื่องจากสารช่วยผสมมีส่วนที่มีขั้วซึ่งน่าจะเข้ากันได้ดีกับ $CaCO_3$ และมีส่วนที่เป็น HDPE ซึ่งเหมือนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ การใช้ HDPE-g-AA ให้ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าการใช้ HDPE-g-MA เล็กน้อย เนื่องจาก HDPE-g-AA มีหมู่ที่มีขั้วในโครงสร้างมากกว่า HDPE-g-MA เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน

พลชีพ ลิ้มพงษ์[17] ทำการศึกษาสมบัติของ HDPE ที่ใช้สำหรับงานเป่าขึ้นรูป โดยผสม $CaCO_3$ ในปริมาณ 0-30% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA และมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม (0-10% โดยน้ำหนัก) พบว่าเมื่อใช้ SA ปรับปรุงพื้นผิวของ $CaCO_3$ ทำให้ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$ มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และพบว่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น มอดุลัสลดลง เนื่องจากเป็นการเพิ่มวัฏภาคของพอลิเมอร์ ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ HDPE-g-MA 1% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ HDPE-g-MA มากกว่า 1% เนื่องจาก HDPE-g-MA ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการแยกวัฏภาค นอกจากนี้เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ผสม $CaCO_3$ บางสูตรมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด พบว่าพอลิเมอร์ทั้งที่มีและไม่มี $CaCO_3$ 20% มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน น้ำหนักต่อขวดของขวด HDPE บริสุทธิ์ต่ำกว่าน้ำหนักของขวดที่ได้จาก HDPE ผสม $CaCO_3$ แต่ความหนาของขวดได้ผลในทางตรงข้าม สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างจากการฉีดขึ้นรูปที่นำมาทดสอบก่อนผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป

Strebel [18] ศึกษาสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของขวดพอลิเอทิลีน โดยใช้ขวด HDPE ที่มีค่าดรรชนีการไหล (MFI) แตกต่างกัน พบว่าเมื่อ MFI มีค่าลดลง การแตกของชิ้นงานใช้เวลานานขึ้น ซึ่ง ESCR จะแปรตามเวลา ค่า ESCR สูงๆ จะทนต่อสภาพแวดล้อมได้นาน จึงสรุปได้ว่า HDPE ที่ค่า MFI ต่ำ ๆ จะมีค่า ESCR ดีกว่า HDPE ที่มีค่า MFI สูงๆ

ตารางที่ 2.1 ผลของค่าดรรชนีการไหลที่มีต่อสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม [18]

สมบัติ	เกรดของขวด HDPE			
	A	B	C	D
MFI (g/10 min)	0.33	0.33	0.30	0.20
ESCR (h)	14.0	15.0	28.4	144.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูป (H6240B) จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด มหาชน สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[19]

สมบัติ	หน่วย	HDPE (H6240B)	การทดสอบ
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	0.962	ASTM D 1505
ดรรชนีการไหล	กรัม/10 นาที	0.4	ASTM D 1238
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	132	ASTM D 2117
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	128	ASTM D 1525
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	<-60	ASTM D 746
ความแข็ง (Shore D)	-	64	ASTM D 2240
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	350	ASTM D 638
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	280	ASTM D 638
เปอร์เซนต์การยืดออก	%	>500	ASTM D 638
ความต้านทานแรงกระแทก	กก./ตร.ซม.	12	ASTM D 256
ความสามารถในการทรงรูป	กก./ตร.ซม.	11500	ASTM D 747

2. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกรดไม่เคลือบผิว (Omyacarb 2) และเกรดเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) จากบริษัทสุรินทร์ออมย่าเคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน[20]

สมบัติ	หน่วย	$CaCO_3$ (Omyacarb 2)	$CaCO_3$ (Omyacarb 2T)
ขนาดอนุภาค	μm	2.8	2.7
ความหนาแน่น	g/cm^3	2.7	2.7
เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก 1%	-	ไม่เคลือบ	เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) เกรด Polybond® 3009 ซึ่งมีค่าดรรชนีการไหล (MFI) เท่ากับ 5 g/10 นาที และมีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA) เท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder): Intro Engineering รุ่น PL 200 (Screw : length = 330 mm, diameter = 31.1 mm drive and 19.7 mm output end)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder): Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
3. เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine): SMC Co., Ltd รุ่น 200T (Screw : length = 22D, diameter = 30 mm)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine): LLYOD Instrument Co., Ltd รุ่น LLOYD LR 30K
5. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester): Italia Co., Ltd รุ่น DTSFDDR
6. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer): Rosand Precission Co., Ltd รุ่น Rh 7/2
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC): Perkin Elmer Co., Ltd รุ่น DSC7
8. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) : Shimadzu Co., Ltd รุ่น TGA-51
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM): รุ่น LEO 1455VP
10. ไมโครมิเตอร์: Mitutoyo รุ่น 293265
11. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

1. เตรียมส่วนผสมของสารตัวอย่างให้มีอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยเตรียมสูตรละ 5 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
HDPE	HDPE Pure
CA20(2)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$
CA20(2g)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$ + 1%wt HDPE-g-MA

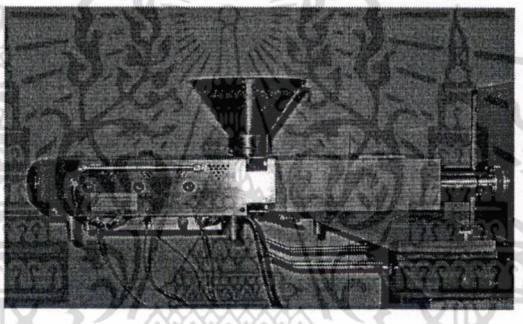
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก) (ต่อ)

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
CA20(2t)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$ (SA 1 %wt)
CA30(2)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$
CA30(2g)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$ + 1%wt HDPE-g-MA
CA30(2t)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$ (SA 1%wt)

2. นำส่วนผสมแต่ละชนิดไปผสม โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แสดงดังรูปที่ 3.1 ที่อุณหภูมิจากส่วนป้อนสารถึงหัวดายเป็น 170 180 190 และ 200°C ตามลำดับ ใช้ความเร็วรอบ 13 รอบต่อนาที

3. นำส่วนผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่มาบดเป็นเม็ดเล็ก ๆ ด้วยเครื่องบดพลาสติก



รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

3.3.2 การทดสอบสารตัวอย่างผสม

3.3.2.1 การทดสอบสมบัติการไหล

นำเม็ดสารตัวอย่างผสมมาทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิหัวดาย 200°C ในช่วงอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ที่ 30-3600 s^{-1} โดยใช้หัวดายเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ความยาว 0 และ 16 mm มุม 180 เพื่อแก้ไขค่าความดันที่ได้เพื่อให้ได้ความหนืดที่มีค่าถูกต้อง ตาม ASTM D 3835[21]

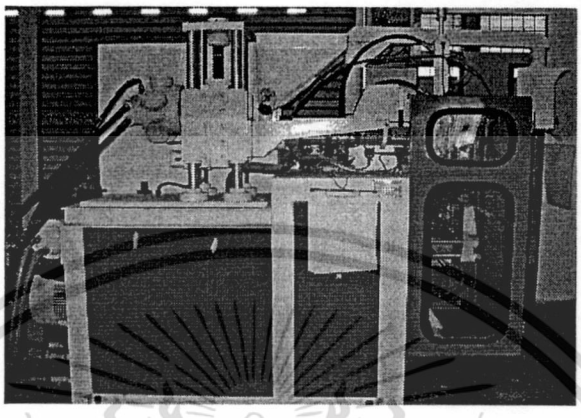
3.3.2.2 ศึกษาการบวมตัวจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Die swell) โดยการตัดสารตัวอย่าง (Extrudate) ที่ไหลออกจากหัวดายของ Capillary rheometer ขนาด 3-4 เซนติเมตรลงบนกระดาษจำนวน 5 ชิ้น ที่อัตราความเครียดเฉือน 30 60 และ 150 s^{-1} ที่อุณหภูมิหัวดาย 200°C ในช่วงเวลาคงที่ จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Extrudate เพื่อนำไปคำนวณหาค่าDie swell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

นำเม็ดสารตัวอย่างที่ผสมและบดไปเป่าขึ้นรูปเป็นขวด ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine) แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้อุณหภูมิจากส่วนป้อนสารถึงหัวดายเป็น 170 180 190 และ 200°C ตามลำดับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 17 °C ความเร็วรอบที่ใช้ 24 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.2 เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด

3.3.3.1 ศึกษาสภาวะการผลิต

ศึกษาสภาวะในการผลิตขวดขณะทำการเป่าขึ้นรูป ได้แก่ ความดันลมเป่า เวลาในการหล่อเย็น และรอบการผลิต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบผลของสารตัวเติม $CaCO_3$ ที่มีต่อสภาวะการผลิตขวดแต่ละสูตร

3.3.3.2 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร

ศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการขึ้นรูปคือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) โดยเก็บสารตัวอย่างที่ออกจากหัวดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Parison) ในแต่ละความเร็วของสกรูคือ 20 22 24 26 และ 28 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิหัวดาย 200°C ในช่วงเวลาคงที่มาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

3.3.3.3 ศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

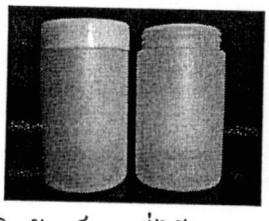
ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Parison swell) โดยการตัดพาริซัน (Parison) ลงในถังน้ำเย็น (อุณหภูมิ 5-8°C) ที่รองรับอยู่จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละความเร็วของสกรู (20 22 24 26 และ 28 รอบต่อนาที) ที่อุณหภูมิหัวดาย 200°C ในช่วงเวลาคงที่ จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพาริซัน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.3.4 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์

ขวดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตสูง 7.7 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 cm และมีปริมาตร 106 cm^3

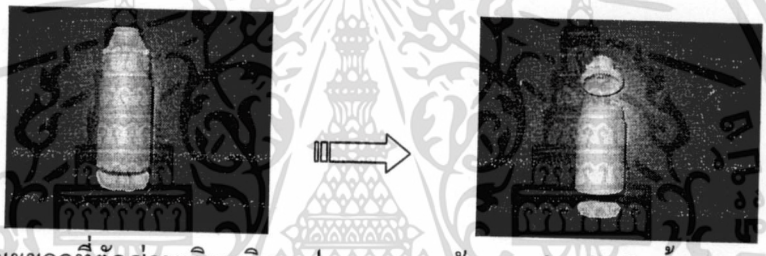


รูปที่ 3.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ก. น้ำหนักต่อขวด

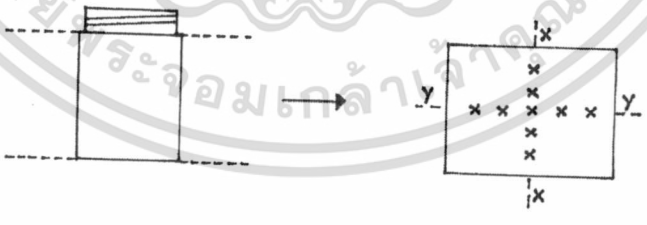
นำขวดที่ขึ้นรูปได้มาตัดพลาสติกส่วนเกินบริเวณปากและก้นขวดออกดังรูปที่ 3.4 จากนั้นนำขวดทุกสูตรๆ ละ 10 ขวดมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด

ข. ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวด

นำขวดมาตัดบริเวณคอขวดและก้นขวดออก แล้วตัดบริเวณรอยต่อของขวดให้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วัดความหนาตามแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งบริเวณละ 5 จุดในระยะเท่าๆ กัน จำนวน 10 ขวด เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ x วัดในแนวตั้งและ y วัดในแนวเส้นรอบวง

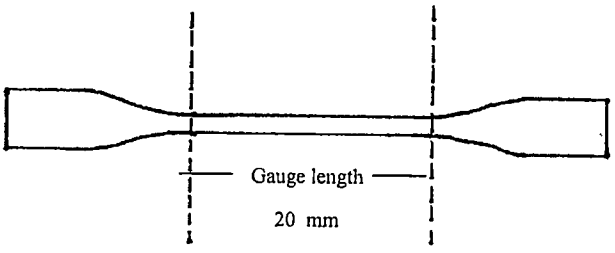
3.3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ก. การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

นำขวดมาตัดบริเวณกลางขวดในแนวเส้นรอบวงและแนวตั้ง โดยลักษณะชิ้นงานที่ได้เป็นรูปดัมเบลล์ดังรูปที่ 3.6 นำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ความเร็วในการดึง 80 mm/min ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้องตาม ASTM D 638 [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

64317



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

ข. การทดสอบสมบัติความแข็งกด

นำชิ้นงานที่ใช้วัดความหนาดังรูปที่ 3.5 มาซ้อนให้มีความหนาประมาณ 6 mm นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตาม ASTM D 2240[23]

ค. การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

นำขวดที่ผลิตได้จำนวน 20 ขวดบรรจุน้ำให้เต็มขวดพร้อมที่ผนึกขวด จากนั้นปล่อยขวดให้ตกสู่พื้นในแนวดิ่งที่ระดับต่างๆ กันแล้วบันทึกจำนวนขวดที่แตกและไม่แตกที่ระดับความสูงต่างๆ กัน นำค่าที่ได้ไปคำนวณความแข็งแรงกระแทกของขวดตาม ASTM D 2463[24]

3.3.4.3 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในสารตัวอย่าง

นำชิ้นสารตัวอย่างที่ตัดจากขวดที่ได้จากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดมาหาปริมาณ $CaCO_3$ โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 ^{0}C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 ^{0}C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 600 ^{0}C ภายใต้อากาศ (Air) นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณ $CaCO_3$ ที่แน่นอนตาม ASTM D 1131[25]

3.3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

นำชิ้นสารตัวอย่างเหมือนการทดสอบที่ผ่านมามาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 20°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200°C และทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นตาม ASTM E 794[26]

3.3.4.5 ศึกษาการกระจายตัวของ $CaCO_3$

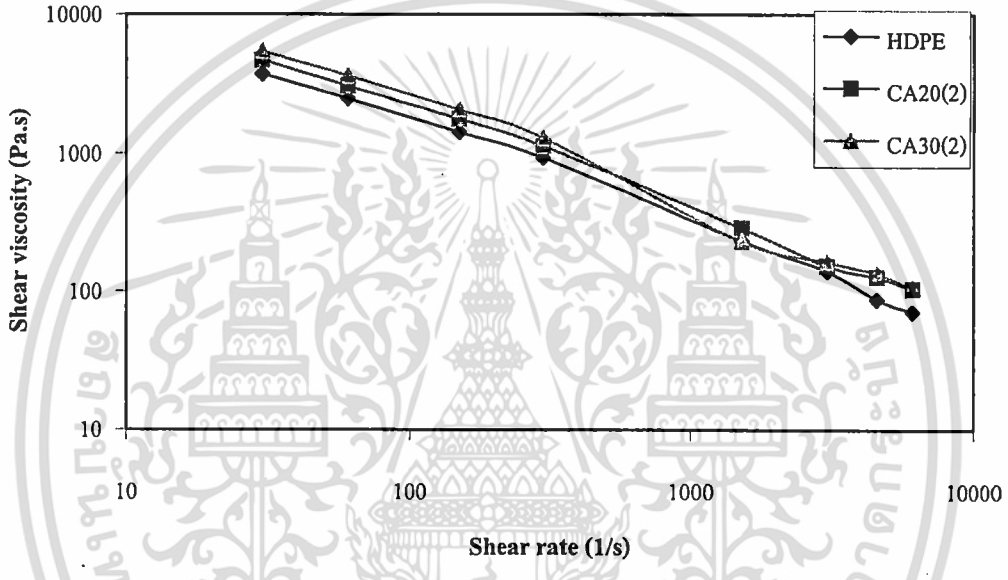
ตัดชิ้นงานบริเวณพื้นผิวรอบขวดมาแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีในขณะชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำพื้นผิวตรงบริเวณรอยหักมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติการไหล

เมื่อนำสารตัวอย่างมาทดสอบสมบัติการไหล โดยพิจารณาค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่อัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ต่างๆ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

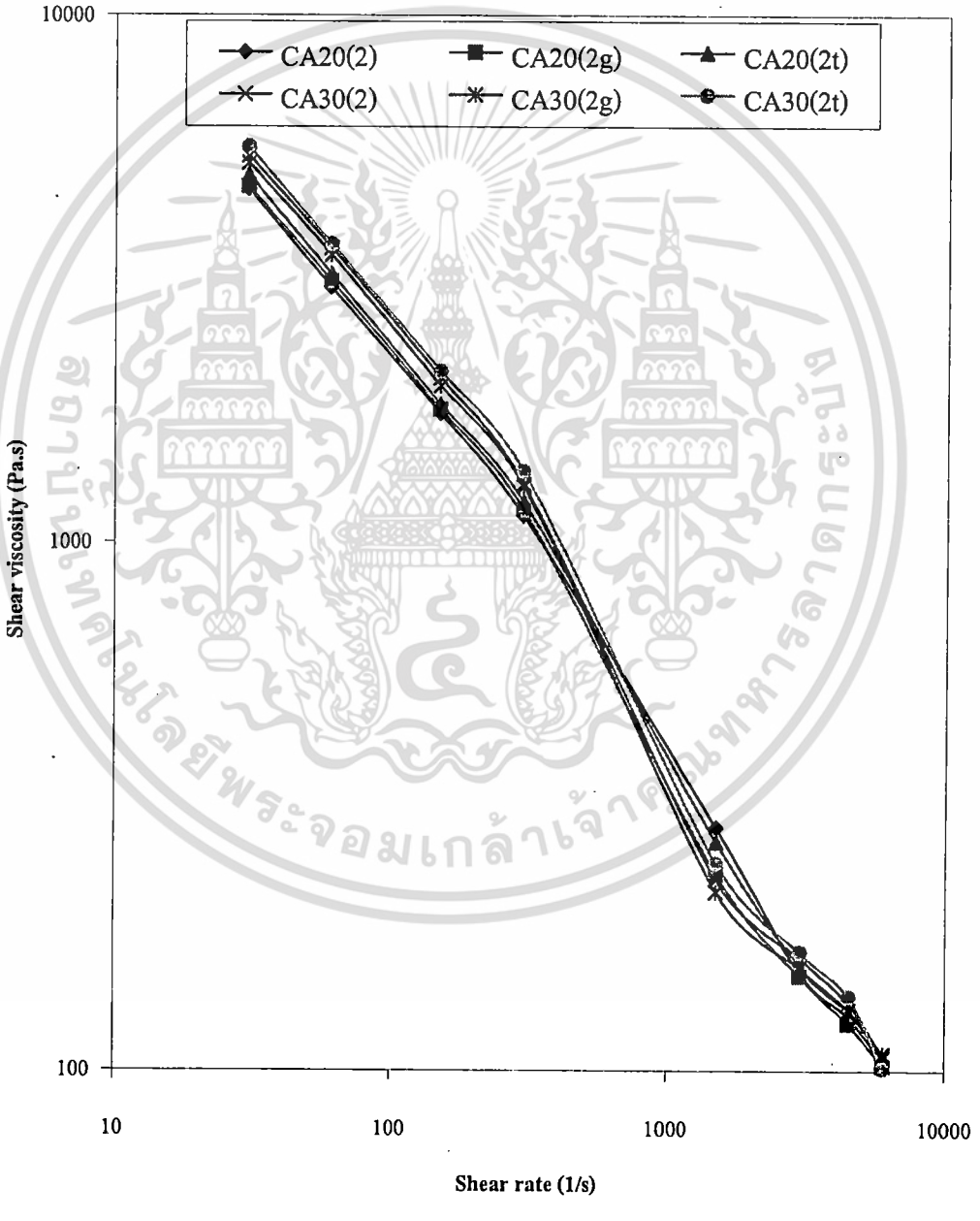


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์สูตร HDPE, CA20(2) และ CA30(2)

จากผลรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ทุกสูตรลดลงเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุล (Disentanglement) ที่อัตราความเครียดเฉือนสูงๆ ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันง่ายขึ้น ค่าความหนืดจึงลดลง แสดงถึงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic [27] และเห็นได้ว่าที่อัตราความเครียดเฉือนสูงๆ ที่มากกว่า 300 s^{-1} ค่าความหนืดที่วัดได้มีความแปรปรวนเกิดขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกขับออกจากดายอย่างรวดเร็ว และยังเกิดการเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวดาย (Melt fracture) ดังนั้นในกระบวนการเป่าขึ้นรูปอัตราความเครียดเฉือนในช่วงที่เหมาะสมคือไม่เกิน 300 s^{-1} จึงต้องพิจารณาการเลือกใช้รอบการหมุนของสกรูที่ทำให้เกิดอัตราความเครียดเฉือนให้สอดคล้องกับอัตราความเครียดเฉือนในช่วงดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลของ $CaCO_3$ พบว่าเมื่อผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$CaCO_3$ ลงใน HDPE ในปริมาณ 20% ทำให้ความหนืดเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ เป็น 30 % เนื่องจากสายโซ่ HDPE เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่แต่อนุภาคของ $CaCO_3$ ซึ่งเป็นของแข็งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นได้น้อย จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE ในบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างสายโซ่ HDPE กับอนุภาคของ $CaCO_3$ จึงทำให้ค่าความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา[17]



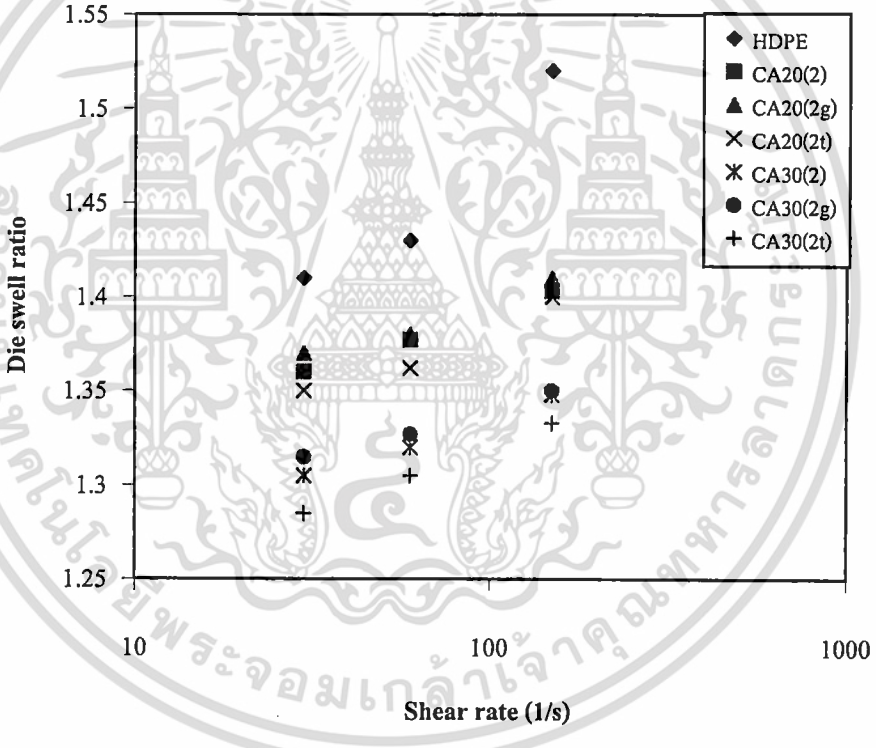
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง สูตร CA20(2), CA20(2g), CA20(2t), CA30(2), CA30(2g) และ CA30(2t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างเพื่อดูผลของการใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) หรือใช้ HDPE-g-MA พบว่าความหนืดเฉือนของสูตรที่มี SA และที่ใส่ HDPE-g-MA ที่ปริมาณ $CaCO_3$ เท่ากันมีแนวโน้มเดียวกัน และมีค่าพอๆ กับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารสองชนิด แสดงว่าสารทั้งสองมิได้ส่งผลต่อความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ตัวอย่าง อาจเนื่องจากปริมาณของสารในกรณีนี้ทั้งสองชนิดที่ใช้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ HDPE

4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยนำค่าการบวมตัว (Die swell ratio) ที่ได้ มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.3 การบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเฉือนมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีเวลาอยู่ในดายน้อยลง การคลายตัวของสายโซ่ HDPE เกิดได้น้อยลงและมีพลังงานสะสมเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ตัวอย่างไหลออกมาบริเวณทางออกของหัวดายพลังงานบางส่วนที่สะสมอยู่เกิดการปลดปล่อย โดยพลังงานส่วนนั้นจะถูกใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่ HDPE ที่หลอมเหลวกลับไปสู่การเกี่ยวพันกัน ในขณะที่ออกจากหัวดาย[27] เมื่อ

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลของ $CaCO_3$ พบว่า HDPE ที่ผสม $CaCO_3$ ทุกสูตรมีค่าการบวมตัวต่ำกว่า HDPE บริสุทธิ์ และเมื่อผสม $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก $CaCO_3$ มีลักษณะเป็นของแข็งไม่เปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งแตกต่างจาก HDPE ที่หลอมเหลวที่มีสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic) ดังนั้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น $CaCO_3$ จะขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ทำให้ความเป็น Elastic ของระบบลดลง จึงส่งผลต่อค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง และที่ปริมาณ $CaCO_3$ 30% เห็นได้ชัดว่าการบวมตัวลดลงเมื่อใช้ $CaCO_3$ เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เพราะกรดสเตียริกช่วยให้ $CaCO_3$ กระจายตัวใน HDPE ได้ดีขึ้น เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นจึงไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ HDPE-g-MA ทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างมีส่วนของสายโซ่ HDPE ที่มีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการบวมตัว

4.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

4.3.1 สภาวะที่ใช้ในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์

ศึกษาผลของ $CaCO_3$ ที่มีต่อสภาวะในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4

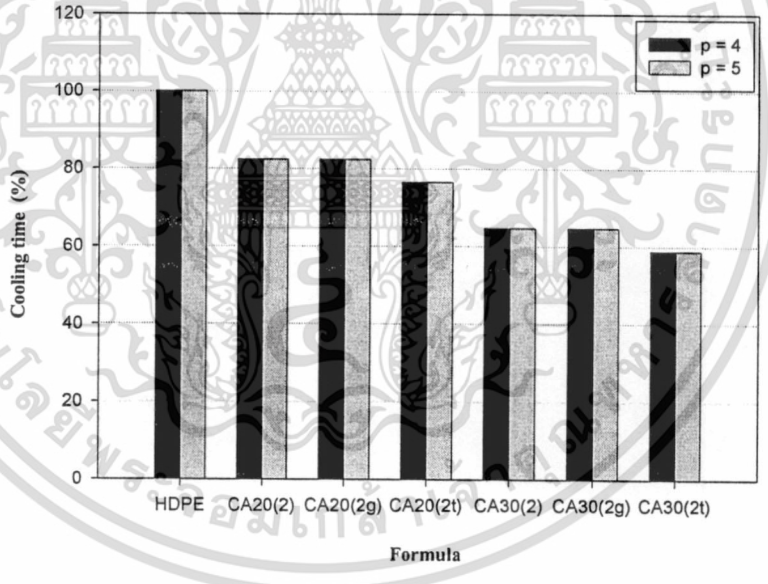
ตารางที่ 4.1 รอบการผลิตโดยรวมของ HDPE และพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

Cycle time	Time x 10^{-1} (s)													
	P = 4 bars							P = 5 bars						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
Mold close	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Carriage down	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Blow pin down	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Blow time	140	120	110	100	90	90	80	140	120	110	100	90	90	80
Holding time	30	20	30	30	20	20	20	30	20	30	30	20	20	20
Cutter time	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total cycle time	180	150	150	140	120	120	110	180	150	150	140	120	120	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ: A = HDPE, B = CA20(2), C = CA20(2g), D = CA20(2t),
E = CA30(2), F = CA30(2g) และ G = CA30(2t)
: เวลาลมที่ใช้เป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Blow time) + เวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในแม่พิมพ์ (Holding time) = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์แต่ละสูตร (A-G) ที่ความดัน 4 และ 5 บาร์ โดยขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) ซึ่งก็คือผลรวมของเวลาลมที่ใช้เป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ (Blow time) กับเวลาที่ขวดผลิตภัณฑ์อยู่ภายในแม่พิมพ์ (Holding time) ทั้งนี้เพื่อให้ได้รอบการผลิตที่ใช้เวลาสั้นที่สุดที่สามารถผลิตขวดผลิตภัณฑ์ที่มีความสมบูรณ์ไม่เสียรูปทรง ผลจากการปรับเปลี่ยนเวลาในการหล่อเย็นที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้รอบการผลิตรวมที่ได้แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบเวลาในการหล่อเย็นของแต่ละสูตรจึงคิดสัดส่วนเวลาในการหล่อเย็นของ HDPE บริสุทธิ์เป็น 100% เวลาในการหล่อเย็นสูตรอื่นเป็นดังกราฟในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เวลาในการหล่อเย็น (%) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรที่ P = 4 และ P = 5
หมายเหตุ: P คือความดันลมเป่าในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปหน่วยเป็นบาร์

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time, %) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลงเมื่อผสม $CaCO_3$ ลงใน HDPE เนื่องจากค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของ $CaCO_3$ (2.5 W/ m.k) สูงกว่าของ HDPE (0.52 W/m.k)[28] ทำให้พอลิเมอร์ตัวอย่างผสมที่ได้มีการส่งผ่านความร้อนออกมาได้มากกว่า HDPE บริสุทธิ์ ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นขวดผลิตภัณฑ์ลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น การใช้ SA ทำให้ใช้เวลาในการหล่อเย็นน้อยกว่าสูตร

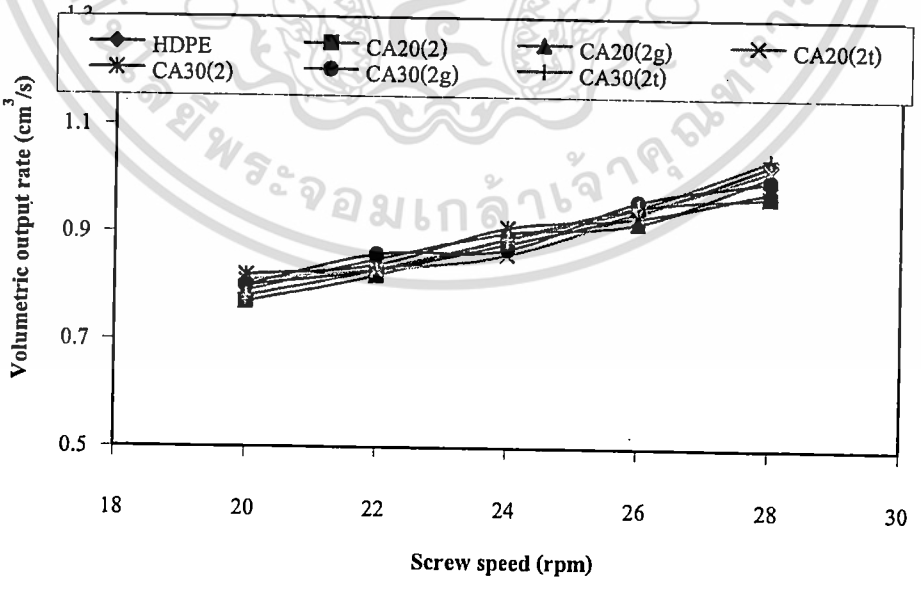
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่มี SA เนื่องจาก SA ทำให้การกระจายตัวของ $CaCO_3$ ดีขึ้น การส่งผ่านความร้อนทำได้ดีขึ้น ส่วนสูตรที่ใช้ HDPE-g-MA จะใช้เวลาในการหล่อเย็นใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้ HDPE-g-MA เนื่องจากมีโครงสร้างหลักเป็นพอลิเมอร์เช่นเดียวกับ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ จึงไม่ช่วยในเรื่องการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการหล่อเย็นมีค่าเท่ากันในแต่ละสูตรเมื่อความดันลมเป่าเพิ่มขึ้น เป็นเพราะขวดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีขนาดเล็ก ความดันปรับเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 5 บาร์ ซึ่งเป็นช่วงที่น้อยมากและเป็นข้อจำกัดของเครื่องเป่าขึ้นรูปขวดรุ่น 200T ทำให้ผลของความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นที่น่าจะช่วยให้ขวดผลิตภัณฑ์เย็นตัวเร็วขึ้นและส่งผลให้รอบการผลิตสั้นลง เนื่องจากการขยายตัวของพาริซันกระทบผิวของแม่พิมพ์ที่เร็วกว่าจึงไม่เห็นผลที่ชัดเจน

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 และที่กล่าวมาข้างต้นทำให้พิจารณาได้ว่า $CaCO_3$ ที่ผสมลงใน HDPE ช่วยลดเวลาในการหล่อเย็นในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนที่ดีของ $CaCO_3$ ทำให้รอบการผลิตโดยรวมทั้งหมดลดลง ซึ่งในแง่ของอุตสาหกรรมจะเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการผลิตได้

สำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์เลือกใช้รอบการผลิตและสภาวะการผลิตของสูตร HDPE บริสุทธิ์ในการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ทุกสูตร เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้สารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น

4.3.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างในกระบวนการเป่าขึ้นรูป



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างหลอมเหลวทุกสูตรที่เกิดขึ้นภายในดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดในแต่ละรอบการหมุนของสกรูคือ 20 22 24 26 และ 28 รอบ/นาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่แต่ละรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

รอบการหมุนของสกรู (rpm)	อัตราความเครียดเฉือน (1/s)						
	HDPE	CA20(2)	CA20(2g)	CA20(2t)	CA30(2)	CA30(2g)	CA30(2t)
20	158.02	152.09	156.04	160.00	161.97	158.02	154.07
22	163.95	161.97	167.90	163.95	165.92	169.87	163.95
24	173.82	175.80	177.77	169.87	179.75	171.85	175.80
26	185.67	187.65	181.72	185.67	183.70	189.62	187.65
28	203.45	191.60	199.50	201.48	193.58	197.53	205.43

จากรูปที่ 4.5 พบว่ารอบการหมุนของสกรูที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic (จากผลในหัวข้อ 4.1) และการเพิ่มรอบการหมุนของสกรูเป็นการเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน ทำให้พอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวมีความหนืดลดลง ความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น พาริซันไหลออกจากหัวดายมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก HDPE บริสุทธิ์มีความหนืดที่ต่ำกว่า HDPE ที่ผสม $CaCO_3$ ทำให้ความสามารถในการไหลดี พาริซันจึงไหลออกมาได้มาก แต่มีน้ำหนักเบาเพราะความหนาแน่นขณะหลอมเหลวต่ำ ในทางกลับกัน HDPE ที่มีการผสม $CaCO_3$ ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าทำให้ความสามารถในการไหลออกจากหัวดายลดลง พาริซันจึงไหลออกมาได้น้อย แต่มีน้ำหนักมากกว่าเนื่องจากความหนาแน่นขณะหลอมเหลวสูง ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ที่ไม่มีและมี $CaCO_3$ จึงมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อมีการใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA หรือใช้ HDPE-g-MA พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารสองชนิดที่กล่าวมา แสดงว่าสารทั้งสองมิได้ส่งผลต่อความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ตัวอย่าง เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับ HDPE ในตัวอย่าง

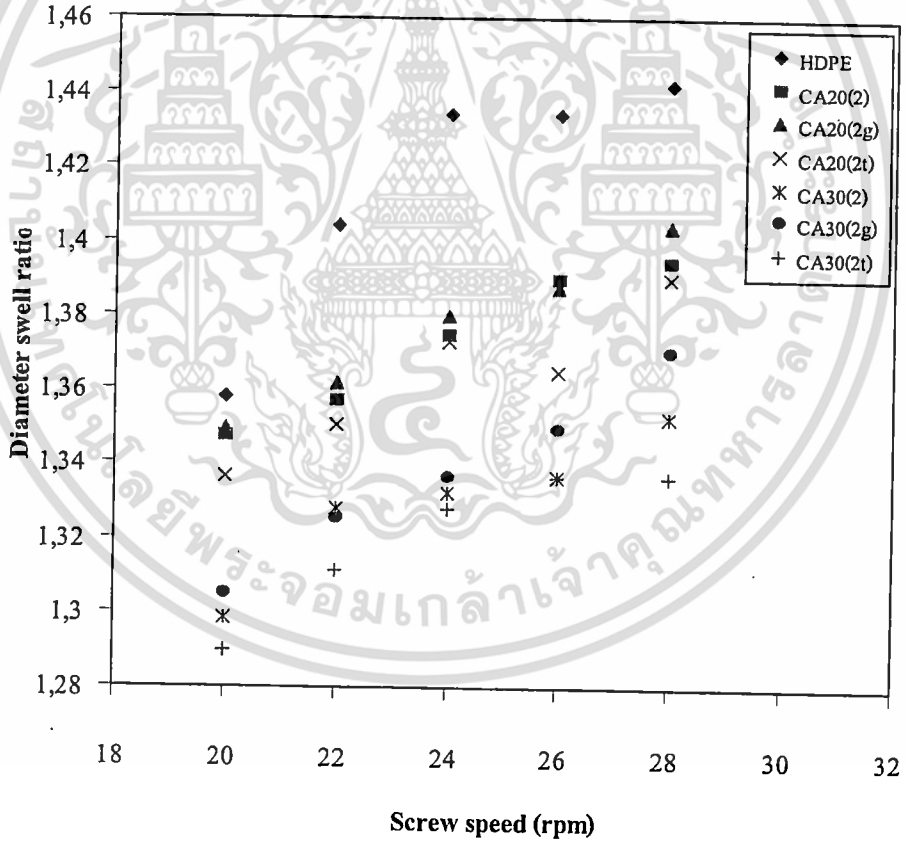
จากตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นภายในดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปจากการใช้รอบการหมุนของสกรูเป็น 20 24 24 26 และ 28 รอบ/นาที โดยเฉพาะที่ 24 รอบ/นาที ซึ่งเป็นรอบการหมุนของสกรูที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉือนที่เกิดขึ้นภายในดายของเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (รูปที่ 4.1) พบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นของเครื่องเป่าขึ้นรูปดังตารางที่ 4.2 อยู่ในช่วง 154.07-205.43 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เกิดความแปรปรวนและเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt fracture) เมื่อเทียบกับอัตราความเครียดเฉือนจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (< 300 s^{-1}) ทำให้ไม่มีผลของ Melt fracture ที่จะมีผลต่อรูปร่างขวดผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังนั้นอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในดายของเครื่องเป่าขึ้นรูปจึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่งผลให้รอบการหมุนของสกรูที่ทำให้เกิดอัตราความเครียดเฉือนดังตารางที่ 4.2 เหมาะสำหรับการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์

4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยนำค่าการบวมตัว (Diameter swell ratio) ที่ได้ มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวของพาริซันกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของสกรูค่าการบวมตัวของพาริซันทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวมีเวลาอยู่ในดายน้อยลงการคลายตัวเกิดได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อถูกขับออกจากหัวดายเกิดการคืนตัวมากขึ้นค่าการบวมตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของ $CaCO_3$ พ บว่าค่าการบวมตัวลดลงเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เ พิ่มขึ้น และเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่ เคลือบผิวด้วย SA ค่าการบวมตัวที่ได้ลดลงมากขึ้น ส่วนการใช้ HDPE-g-MA พบว่าค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มที่ได้ไม่ชัดเจนเหมือนกับผลในหัวข้อ 4.2 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จาก Capillary rheometer ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดและน้ำหนักของพาริซันที่มากกว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวดาย (Extrudate) ของ Capillary rheometer จึงมีผลทำให้เกิดการย้อยตัวของพาริซันส่งผลให้รูปร่าง (หรือขนาด) ของพาริซันเล็กลง นอกจากนั้นในวิธีการทดสอบเพื่อเป็นการป้องกันการโค้งงอและบิดเบี้ยวของพาริซันที่จะนำมาหาค่าการบวมตัว จึงต้องทำให้พาริซันมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้ถังน้ำเย็นรองรับพาริซันที่ตัดจากเครื่องเป่าขึ้นรูป ดังนั้นผลของอุณหภูมิน้ำในถังที่รองรับพาริซันและเวลาที่พาริซันแช่ในถังน้ำจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การบวมตัวของพาริซันมีความแปรปรวนเกิดขึ้น

4.3.4 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

4.3.4.1 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักต่อขวด

สูตร	P = 4 bars		P = 5 bars	
	น้ำหนักต่อขวด (g)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	น้ำหนักต่อขวด (g)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	10.75	0.26	10.77	0.28
CA20(2)	11.64	0.13	11.46	0.14
CA20(2g)	11.46	0.15	11.68	0.12
CA20(2t)	11.60	0.11	11.58	0.10
CA30(2)	11.78	0.12	11.77	0.10
CA30(2g)	11.76	0.11	11.79	0.14
CA30(2t)	11.91	0.19	11.85	0.10

จากตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำหนักของขวด HDPE บริสุทธิ์น้อยกว่าน้ำหนักขวด HDPE ผสม $CaCO_3$ เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงกว่าของ $CaCO_3$ เมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกันพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น ดังนั้นน้ำหนักขวดก็จะเพิ่มตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนหรือส่วนเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากในขั้นตอนการทดสอบการตัดส่วนเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณปากขวดและก้นขวดอาจไม่สม่ำเสมอทำให้น้ำหนักที่ได้แตกต่างกัน แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10-0.28 ดังนั้นผลของ $CaCO_3$ ที่มีต่อน้ำหนักขวดผลิตภัณฑ์จึงมากกว่าความคลาดเคลื่อนหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น

4.3.4.2 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.4 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์

สูตร	แนวนอน				แนวตั้ง			
	ช่วงความหนา (mm)	ความหนา (mm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ความผันแปร (%)	ช่วงความหนา (mm)	ความหนา (mm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ความผันแปร (%)
P = 4 bars								
HDPE	0.93-1.15	1.07	0.01	0.93	0.97-1.17	1.08	0.09	8.33
CA20(2)	0.91-1.16	1.03	0.03	2.91	0.97-1.05	1.01	0.07	6.93
CA20(2g)	0.90-1.17	1.01	0.02	1.98	0.59-1.06	1.01	0.11	10.89
CA20(2t)	0.90-1.19	1.04	0.01	0.96	0.97-1.03	1.01	0.11	10.89
CA30(2)	0.79-1.11	0.97	0.04	4.12	0.81-0.96	0.93	0.13	13.97
CA30(2g)	0.84-1.11	0.99	0.05	5.05	0.89-1.02	0.94	0.19	20.21
CA30(2t)	0.83-1.19	1.00	0.03	3.00	0.95-1.06	1.01	0.13	12.87
P = 5 bars								
HDPE	0.95-1.19	1.09	0.02	1.83	0.98-1.15	1.08	0.09	8.33
CA20(2)	0.91-1.14	1.03	0.03	2.91	0.96-1.05	1.01	0.10	9.90
CA20(2g)	0.89-1.15	1.02	0.02	1.96	0.99-1.07	1.03	0.09	8.73
CA20(2t)	0.90-1.12	1.05	0.02	1.90	0.98-1.07	1.02	0.09	8.82
CA30(2)	0.85-1.09	1.02	0.05	4.90	0.89-0.96	0.93	0.10	10.75
CA30(2g)	0.88-1.09	0.96	0.04	4.16	0.88-1.05	1.00	0.09	9.00
CA30(2t)	0.82-1.17	1.01	0.04	3.96	0.96-1.04	1.00	0.12	12.00

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลของ $CaCO_3$ พบว่าขวดผลิตภัณฑ์สูตรที่ผสม $CaCO_3$ มีความหนาน้อยกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์และความหนาจะลดลงเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคของ $CaCO_3$ ไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ทำให้พาริซันที่ได้มีการบวมตัวน้อยกว่าพาริซันของ HDPE บริสุทธิ์ ส่งผลให้เมื่อเป่าขึ้นรูปเป็นขวดผลิตภัณฑ์ความหนาของขวดสูตรที่ผสม $CaCO_3$ จึงน้อยกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์ ส่วนสัมประสิทธิ์ความผันแปรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ไม่ดีของ $CaCO_3$ นอกจากนั้นอาจเกิดจากชิ้นงานส่วนที่นำมาวัดความหนายังมีส่วนโค้งตามรูปทรงของขวดผลิตภัณฑ์และพื้นผิวด้านในของขวดก็มีความขรุขระจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้ เมื่อพิจารณาความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์สูตรที่ใช้ $CaCO_3$ เคลือบผิวด้วยSA หรือที่ใช้ HDPE-g-MA พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด

เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของขวดในแนวนอนและแนวตั้งพบว่า ความหนาเฉลี่ยทั้งสองแนวของขวดผลิตภัณฑ์ในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการขยายตัวของพาริซันเมื่อทำการเป่าขึ้นรูปทั้งสองแนวพอๆ กัน ส่วนสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิภัณฑ์ในแนวนอนจะมีค่าน้อยกว่าแนวตั้ง เพราะในแนวนอนนั้นพาริซันของพอลิเมอร์ตัวอย่างขยายตัวออกอย่างสม่ำเสมอเป็นทรงกระบอก ทำให้ความหนาใกล้เคียงกันเมื่อเป่าขึ้นรูปเป็นขวดผลิตภัณฑ์ ส่วนในแนวตั้งมีอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเนื่องจากน้ำหนักของพาริซันเข้ามาเกี่ยวข้อง พาริซันที่อัดรีดออกจากหัวดายจึงมีการยืดตัวออกตามน้ำหนักตัวของพาริซัน (Sagging) ทำให้ความหนาของพาริซัน บริเวณคอขวดมีน้อยและความหนาจะมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงก้นขวด ดังนั้นความหนาของขวดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่คอขวดถึงก้นขวดจึงแตกต่างกัน โดยที่ก้นขวดจะมีความหนามากกว่าคอขวด ในส่วนของความดันลมเป่าที่มีการปรับเปลี่ยนจะให้ค่าความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์ทุกสูตรใกล้เคียงกัน เนื่องจากขวดผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กและความดันก็มีการปรับขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 4 เป็น 5 บาร์ ดังนั้นความหนาที่จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดันจึงไม่เห็นผลที่ชัดเจน

4.3.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

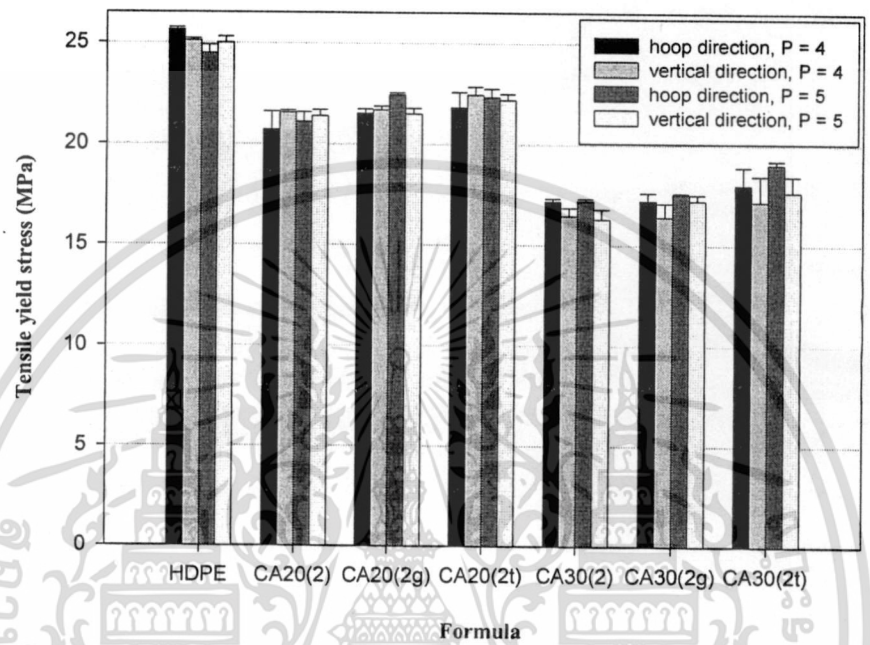
4.3.5.1 ความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากและมอดุลัส

จากรูปที่ 4.7-4.9 เมื่อพิจารณาความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และมอดุลัสของขวดผลิตภัณฑ์ในแนวเส้นรอบวงหรือแนวนอน (Hoop direction) และแนวตั้ง (Vertical direction) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการขยายตัวของพาริซันในแนวนอนและแนวตั้งมีการขยายตัวพอๆ กัน เพราะขวดผลิตภัณฑ์มีรูปทรงกระบอกและมีขนาดเล็กโดยมีปริมาตรเท่ากับ 106.72 cm^3 และความสูงเท่ากับ 7.70 cm ส่งผลให้การจัดเรียงตัวในแนวนอนและแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงกันหรือสมดุลกัน

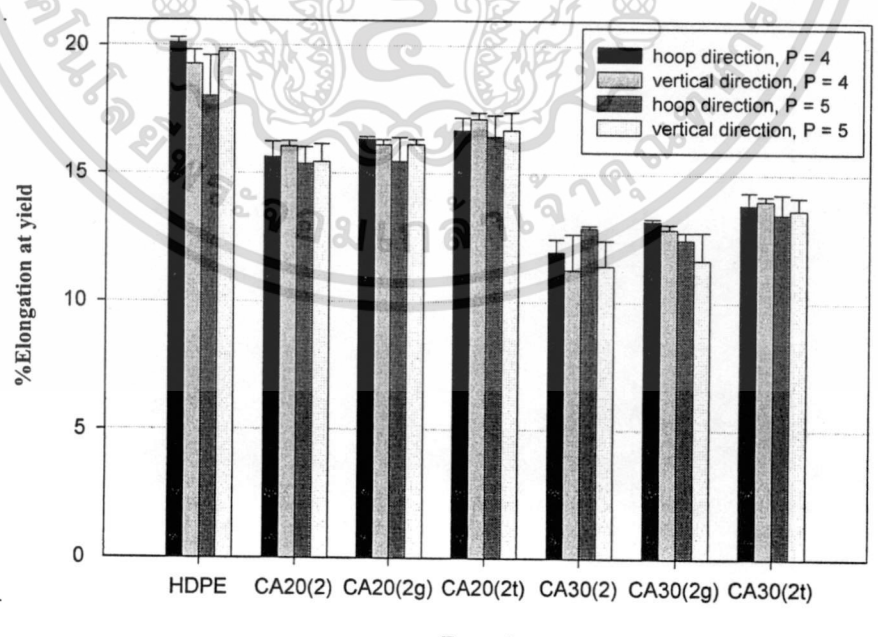
เมื่อปรับเพิ่มความดันลมเป่าที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และมอดุลัสของขวดผลิตภัณฑ์ในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากขวดมีขนาดเล็กและการปรับเพิ่มความดันก็มีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์จึงทำให้ปรับเพิ่มขึ้นได้จาก 4 เป็น 5 บาร์ ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มความดันที่จะช่วยให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ของขวดผลิตภัณฑ์ในแนวนอนหรือแนวเส้นรอบวงเพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ไม่ให้ผลที่ชัดเจน

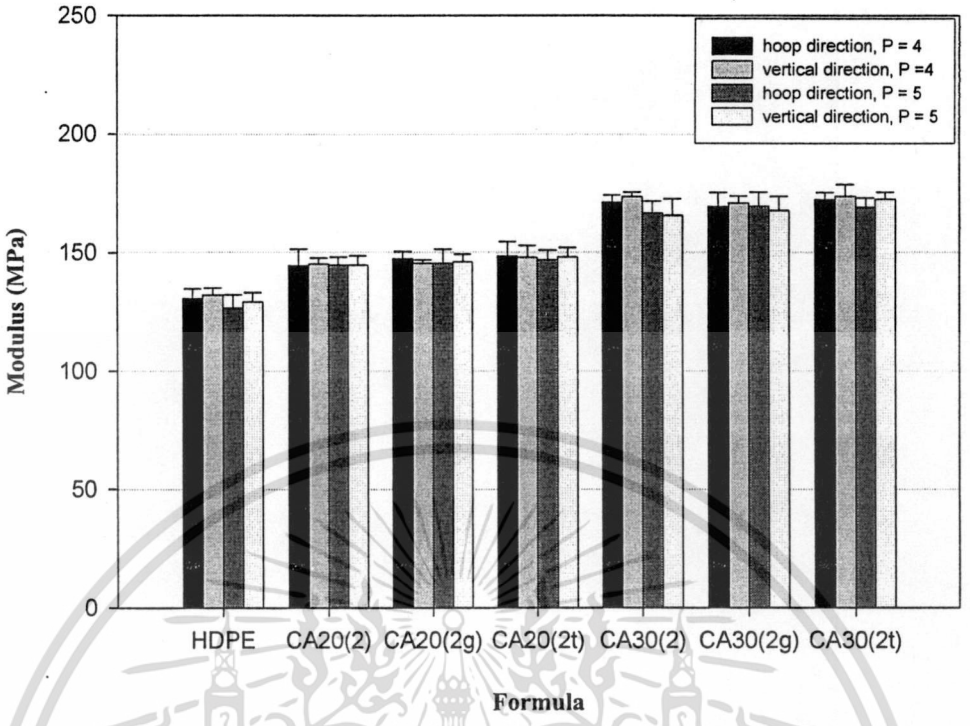


รูปที่ 4.7 ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5



รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อผสม $CaCO_3$ ลงใน HDPE ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากมีค่าลดลง เนื่องจาก HDPE ซึ่งเป็นเมตริกซ์เป็นวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว แต่ $CaCO_3$ เป็นวัฏภาคที่มีขั้ว เมื่อผสมกันวัฏภาคทั้งสองจึงไม่เกิดแรงกระทำระหว่างกันทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ $CaCO_3$ ที่เติมลงไปมีโอกาสรวมกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนั้นยังเป็นการลดวัฏภาคในส่วนของพอลิเมอร์ (HDPE) ซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงดึง ดังนั้นความสามารถในการรับแรงจึงลดลงตามปริมาณพอลิเมอร์ที่ลดลง ส่งผลให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากลดลง จากนั้นเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่ได้รับการเคลือบผิวด้วย SA จะช่วยให้การกระจายตัวของ $CaCO_3$ ใน HDPE ดีขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของ $CaCO_3$ กับ HDPE ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการใช้ HDPE-g-MA เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกับเมื่อไม่ได้ใช้สารช่วยผสม

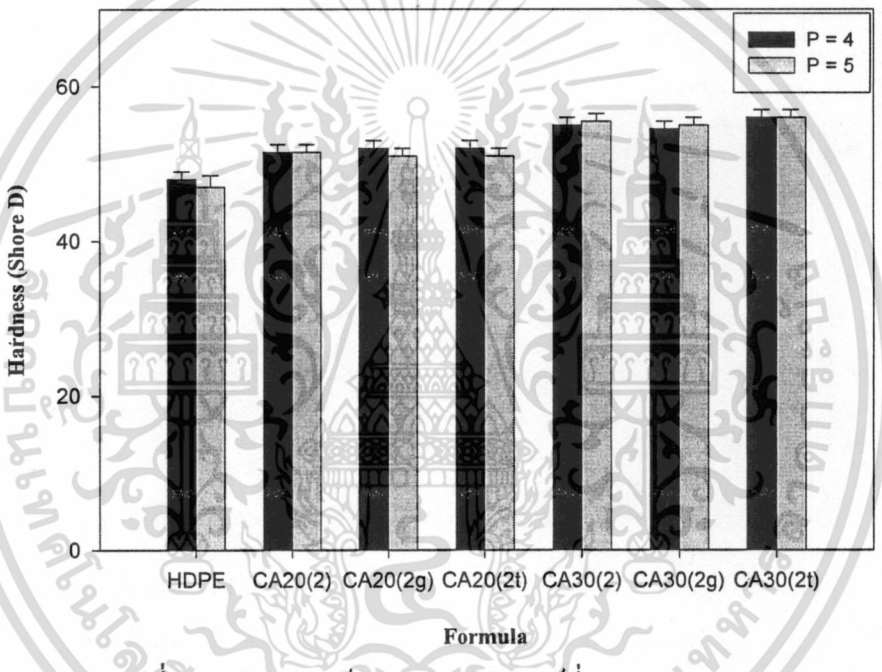
จากรูปที่ 4.8 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของ HDPE มีค่าลดลงเมื่อผสม $CaCO_3$ เนื่องจากอนุภาค $CaCO_3$ เป็นอนุภาคที่แข็งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำได้ยากต่างจากสายโซ่ HDPE ที่เป็นเมตริกซ์ จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE และ $CaCO_3$ ที่เติมลงไปจะเข้าไปแทรกตัวในเนื้อพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำให้ความต่อเนื่องของ HDPE ลดลง ดังนั้นความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างจึงลดลง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากจึงมีค่าลดลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเมอร์ตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SA ช่วยลดความมีขั้วของ $CaCO_3$ ทำให้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัวดีขึ้นเพิ่มความต่อเนื่องของ HDPE เมตริกซ์ ส่วน HDPE-g-MA ให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดณ จุดครากใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมสารตัวเติม $CaCO_3$ เนื่องจาก $CaCO_3$ ที่เติมลงไปมีมอดุลัสสูงกว่า HDPE [28] ดังนั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีมอดุลัสเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA พบว่ามอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับสูตรอื่น เช่นเดียวกับสูตรที่ใช้ HDPE-g-MA เนื่องจากผสมในปริมาณน้อย

4.3.5.2 ความแข็งกด



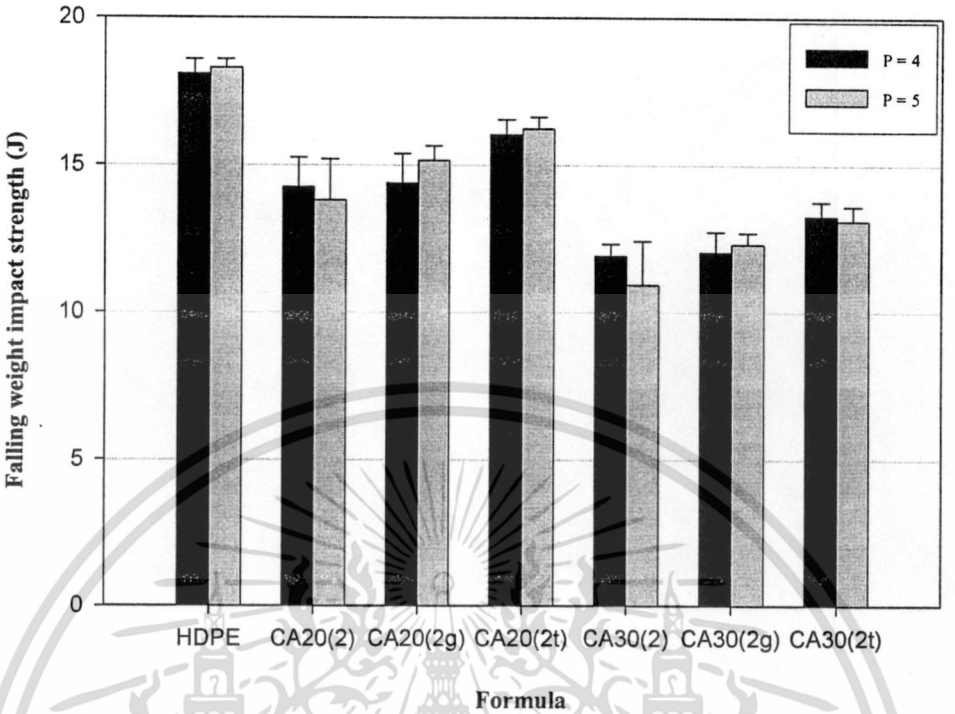
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งกดของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.10 พบว่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ผสม $CaCO_3$ มีค่าสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจากอนุภาค $CaCO_3$ มีความแข็งกด (3 โมห์สเกล) [28] มากกว่า HDPE เมื่อนำมาผสมกันพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีความแข็งกดสูงขึ้นทนต่อแรงกดได้ดีขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ $CaCO_3$ ส่วนการใช้ SA และ HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อความแข็งกด ส่วนความดันที่ปรับเปลี่ยนไม่มีผลต่อความแข็งกดของผลิตภัณฑ์

4.3.5.3 ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

นำขวดผลิตภัณฑ์ที่เป่าขึ้นรูปมาทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก (Falling weight impact strength) ผลที่ได้ (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ฉ) แสดงดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักที่ P = 4 และ P = 5

จากรูปที่ 4.11 พบว่า Falling weight impact strength ของ HDPE มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสม $CaCO_3$ เนื่องจาก $CaCO_3$ ทำให้ความต่อเนื่องของ HDPE เมตริกซ์ลดลง และการที่เป็นอนุภาคแข็งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเทียบกับสายโซ่ HDPE เมตริกซ์ Falling weight impact strength จึงลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่ม จากนั้นเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA พบว่าพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่า Falling weight impact strength เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SA ช่วยลดความมีขั้วของ $CaCO_3$ ทำให้การกระจายตัวดีขึ้นลดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มความต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงของ HDPE ส่วน HDPE-g-MA ช่วยในการผสมระหว่าง HDPE กับ $CaCO_3$ ทำให้ค่า Falling weight impact strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนของความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า Falling weight impact strength เช่นเดียวกับผลในหัวข้อ 4.3.5.1

4.3.6 ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณของ $CaCO_3$ ที่วัดได้จากพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่กำหนดไว้คือ 20% และ 30% แสดงให้ทราบว่าการผสมพลาสติกกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเติมแต่งโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ตลอดจนสภาวะที่ใช้เป็นวิธีที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสม HDPE กับ $CaCO_3$ ให้ได้อัตราส่วนใกล้เคียงกันตรงตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.5 ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

สูตร	องค์ประกอบ	ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ (%wt)	
		P = 4	P = 5
HDPE	HDPE บริสุทธิ์	0.0	0.0
CA20(2)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$	19.9	18.5
CA20(2g)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$ + 1%wt HDPE-g-MA	20.1	20.2
CA20(2t)	HDPE + 20%wt $CaCO_3$ (SA 1%wt)	20.0	17.4
CA30(2)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$	31.0	31.1
CA30(2g)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$ +1%wt HDPE-g-MA	30.7	29.6
CA30(2t)	HDPE + 30%wt $CaCO_3$ (SA 1%wt)	31.4	30.8

4.3.7 สมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.6 พบว่า $\%Cry_f$ ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าน้อยกว่า $\%Cry_c$ เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรก่อนนำมาทดสอบด้วยเครื่อง DSC ได้ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแล้วทิ้งผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้ให้เย็นตัวภายในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาจจะมีอัตราการลดอุณหภูมิเร็วกว่าอัตราการลดอุณหภูมิของเครื่อง DSC ส่งผลให้เกิดผลึกขนาดเล็กและไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับที่ได้จากเครื่อง DSC

เมื่อพิจารณาค่า T_m และ T_c ของพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ แสดงว่า SA ที่เคลือบผิว $CaCO_3$ และ HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ตัวอย่าง ในส่วนของ $\%Cry_f$ และ $\%Cry_c$ ให้ผลในทำนองเดียวกับ T_m และ T_c ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า $CaCO_3$ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ HDPE

การเปลี่ยนแปลงความดันในขั้นตอนการผลิตพบว่า T_m, T_c, $\%Cry_f$ และ $\%Cry_c$ ของพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความดันที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตใกล้เคียงกันและความดันปรับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่ HDPE และขนาดผลึกที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อน

สูตร	T_m (^{0}C)	ΔH_f (J/g)	%Cry_f	T_c (^{0}C)	ΔH_c (J/g)	%Cry_c
P = 4						
HDPE	135	196	67	116	208	71
CA20(2)	133	155	66	118	168	71
CA20(2g)	133	145	62	117	165	70
CA20(2t)	132	150	64	118	169	72
CA30(2)	132	135	66	118	145	72
CA30(2g)	131	140	69	118	140	69
CA30(2t)	132	137	68	119	144	71
P = 5						
HDPE	134	194	66	117	206	70
CA20(2)	132	151	63	116	167	69
CA20(2g)	133	153	65	117	169	72
CA20(2t)	133	148	61	117	168	69
CA30(2)	132	134	66	117	144	71
CA30(2g)	132	135	65	118	144	70
CA30(2t)	133	133	65	118	141	69

หมายเหตุ: T_m คืออุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก

ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวผลึก (พื้นที่ให้พีกจากขั้นตอน Heating)

%Cry_f คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

T_c คืออุณหภูมิของการเกิดผลึก

ΔH_c คือเอนทาลปีของการเกิดผลึก (พื้นที่ให้พีกจากขั้นตอน Cooling)

%Cry_c คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขวด HDPE ที่ผสมสารตัวเติม $CaCO_3$ ชนิดที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีพฤติกรรมเป็นแบบ Pseudoplastic โดยความหนืดมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA หรือใช้ HDPE-g-MA ความหนืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด
- ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่อง Capillary rheometer และจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ SA พบว่าค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลง และเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HDPE-g-MA และการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเฉือนมีค่ามากขึ้น
- พอลิเมอร์ตัวอย่างมีเวลาในการหล่อเย็น (%) ลดลงเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA เวลาในการหล่อเย็น (%) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ $CaCO_3$ ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วย SA ส่วนสูตรที่ใช้ HDPE-g-MA มีเวลาในการหล่อเย็น (%) ใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสม ส่วนความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อเวลาในการหล่อเย็น
- อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรูในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป
- น้ำหนักของขวดพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม $CaCO_3$ มีค่ามากกว่า แต่ความหนาขวดน้อยกว่าขวด HDPE และความหนาของขวดทุกสูตรในแนวนอนและแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สัมประสิทธิ์ความผันแปรขวดในแนวตั้งมีค่ามากกว่าแนวนอน
- เมื่อผสม $CaCO_3$ ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความเค้นดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากมีค่าลดลง เมื่อมีการเคลือบผิวด้วย SA ทำให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อค่าสมบัติดังกล่าว
- มอดุลัสและความแข็งกดมีค่ามากขึ้นเมื่อ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น และพบว่ามอดุลัสและความแข็งกดของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA หรือใช้ HDPE-g-MA
- เมื่อผสม $CaCO_3$ ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าลดลง และเมื่อใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA หรือใช้ HDPE-g-MA ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการเป่าขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก มอดุลัสและค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก
- พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้ $CaCO_3$ ที่เคลือบผิวด้วย SA หรือการใช้ HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

จากผลงานวิจัยนี้พบว่าขวด HDPE/$CaCO_3$ ช่วยให้ต้นทุนการผลิตลดลง เนื่องจากเป็นการลดปริมาณการใช้พลาสติก (HDPE) และยังสามารถลดเวลาในการผลิต (Cycle time) ขวดผลิตภัณฑ์ลงได้ นั่นคือช่วยให้อัตราการผลิตขวดผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสภาวะและสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสม $CaCO_3$ โดยใช้ $CaCO_3$ ที่มีขนาดแตกต่างกัน
2. ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในหลายรูปแบบหลายขนาด เพื่อความหลากหลายในการใช้งานตลอดจนศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. ทำการปรับเปลี่ยนเครื่องมือในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการผสมองค์ประกอบต่างๆ ให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. โฉลก ปึงตระกูล. **รายงานการสัมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย.** กรุงเทพมหานคร : ศูนย์การบรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
2. ปรีชา พหลเทพ. **โพลีเมอร์.** กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2531.
3. Jesse E. **Plastic Additive and Modifiers Handbook.** 1st Ed. **London** : Chapman & Hall, Inc. 1996.
4. อรอุษา สรวารี. **สารเคลือบผิว.** กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
5. ปรีดา พิมพ์ขาวดำ. **เซรามิกส์.** กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
6. Riegeland Emil R. **Handbook of Industrial Chemistry.** 9th Ed. NewYork : VNR, C. 1992.
7. Wade L.G. **Organic Chemistry.** New Jersey : Prentice-Hill, Inc. 1995.
8. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. **เอกสารประกอบการเรียนวิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์.** กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
9. Zhanhai Y., Zhihui Y., Guoen S., Chaozhong L., Jin T., Luquan R., and Jinghua Y. "Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MA as a Compatibilizing Agent." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 75, no. 2, January 2000. pp. 232-238.
10. เจริญ นาคะสรรค์. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก.** กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2544.
11. Sumanutvarapun P., Prasassarakich P., Trakulcoo K., and Kiatkamjornwong S. "Mechanical Properties of Polyethylene Filled with Calcium Carbonate." *J.Sci.Res.Chula.Univ.* vol. 19, no. 2, 1994. pp. 235-248.
12. Zuiderduim W.C.J., Westzaan C., Hue'tink J., and Gaymans R.J. "Toughening of Polypropylene with Calcium Carbonate Particle." *Polym.* vol. 44, 2003. pp. 261-275.
13. Huang H.X. and Liao C.M. "HDPE/PA6 blends : parison formation behaviour in extrusion blow molding." *Polym.Test.* vol.. 22, 2003. pp. 509-513.
14. Wang Q., Chen H., and Liu Y. "LDPE-g-MAH Prepared Though Solid-Phase Mechanochemistry and Its Compatibilizing Effects on HDPE/$CaCO_3$." *Polym.Plast.Technol.Eng.* vol. 41, no. 2, 2002. pp. 215-228.
15. ปรมินทร์ ช้างเพชร และประกฤษฎิ์ แสงทองอโณทัย. "การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมโดยใช้สารคู่ควบ" โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

16. ธนเรศ ประเสริฐวงษ์ และธราศรัย แสงภักดี. "การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต" โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
17. พลชีพ ลิ้มพงษ์. "การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ เป็นสารตัวเติมสำหรับงานเป่าขึ้นรูป" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
18. Strebel J.J. "ESCR Performance of Blow Molded Polyethylene Bottles as Measured by the Internal Pressure Test." *Polym.test.* vol. 14, 1995. pp. 189-202.
19. เอกสารภายใน บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (มหาชน).
20. เอกสารภายใน บริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด.
21. Roberta A.S. "Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.03, 1992. pp. 201-207.
22. Roberta A.S. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.01, 1992. pp. 155-171.
23. Roberta A.S. "Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.02, 1992. pp. 226-229.
24. Roberta A.S. "Standard Test Method for Drop Impact Resistance of Blow-Molded Thermoplastic Containers." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.01, 1992. pp. 266-270.
25. Roberta A.S. "Standard Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 14.02, 1992. pp. 712-716.
26. Roberta A.S. "Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis." *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 14.02, 1992. pp. 582-585.
27. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. **เอกสารประกอบการเรียนเรื่องพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้.** กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
28. James E. Mark. **Physical Properties of Polymer Handbook** New York : Woodbury.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราความเครียดเฉือน

หาปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวได้จาก

ความหนาแน่น HDPE หลอมเหลว = 770 kg/m^3 [16]

ความหนาแน่น $CaCO_3$ = 2,700 kg/m^3 [20]

ดังนั้น ปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวคือ

$$\frac{(100 - \%CaCO_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.5})}{770} + \frac{\%CaCO_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.5}}{2,700}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว = $\frac{100}{\text{ปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว}}$

จะได้ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) = $\frac{\text{น้ำหนักของพาริซันที่ไหลออกมา}}{\text{ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว}}$

จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้สามารถคำนวณอัตราความเครียดเฉือนได้จาก

$$\text{อัตราความเครียดเฉือน (Shear rate, } \dot{\gamma}) = \frac{6Q}{WH^2}$$

โดย Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

W คือ

$$\text{ความกว้างของดาย (cm)} = \frac{\text{เส้นรอบวงภายนอกของหัวดาย} + \text{เส้นรอบวงภายในของหัวดาย}}{2}$$

$$= \frac{1.5 + 1.2}{2}$$

$$= 1.35 \text{ cm}$$

H คือ ความหนาของดายมีค่าเท่ากับ 0.15 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้